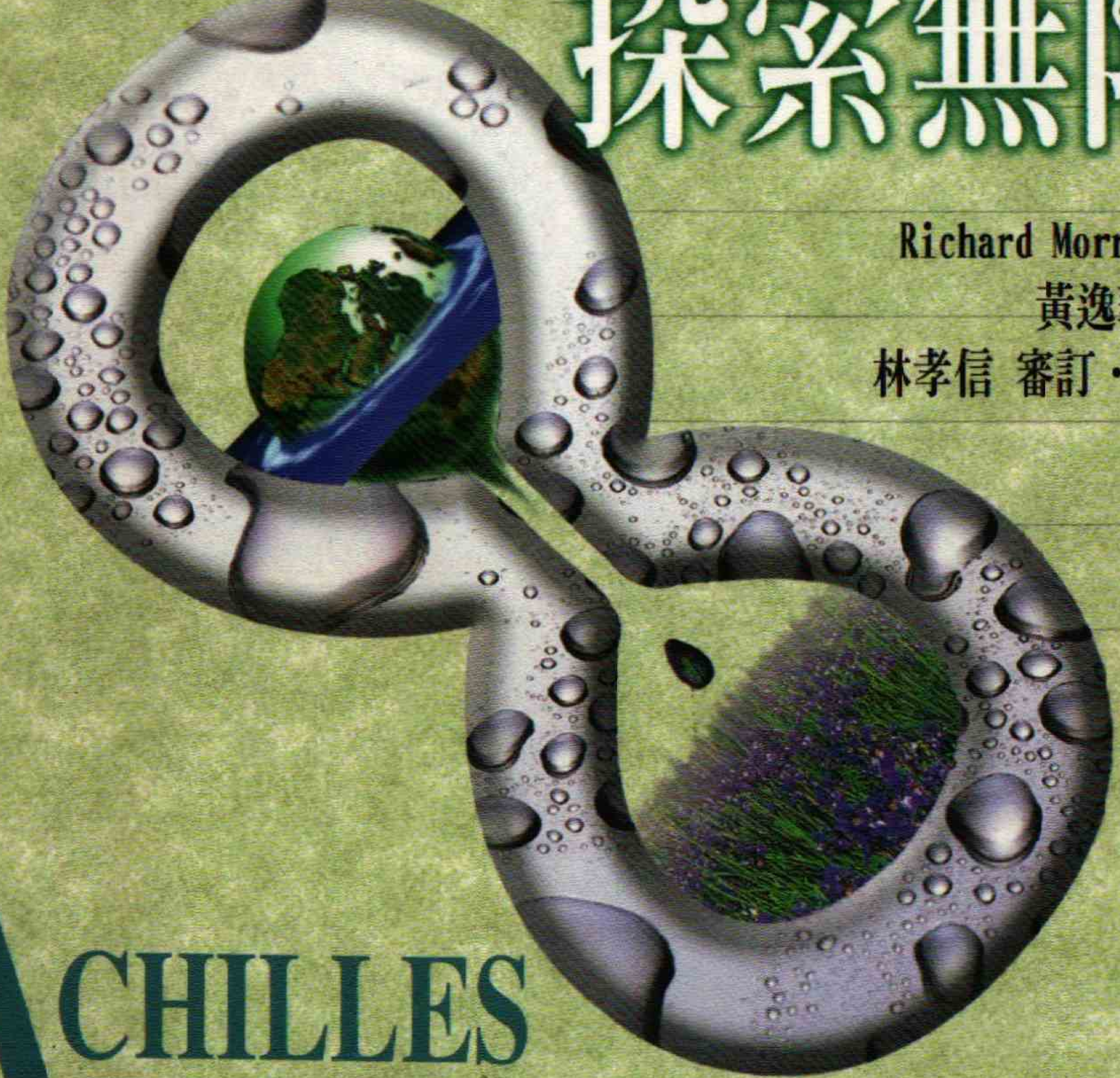
無限
探索無限

Richard Morris 著
黃逸華 譯
林孝信 審訂・導讀



ACHILLES IN THE QUANTUM UNIVERSE

THE DEFINITIVE HISTORY OF INFINITY

無限
探索無限

Richard Morris◎著
黃逸華◎譯
林孝信◎審訂・導讀

ACHILLES IN THE QUANTUM UNIVERSE

THE DEFINITIVE HISTORY OF INFINITY

目錄 CONTENTS

導讀

「無限」的誘惑
「無限」的作用

林孝信

「無限」可能是人類發展出來的概念中，最令人著迷而又最令人難以理解者。古今中外，不知有多少智者哲人，為此而廢寢忘食，衣帶漸寬；又有多少充滿想像力的年輕男女，在她（他）們那做夢作詩的年齡，冥思著時間的無窮無盡，空間的無邊無涯，為自己編織多少甜美的幻想、或玄想自己在浩瀚的時空的孤單而顫慄不已。三百五十年前，法國數學家巴斯卡（Blaise Pascal, 1623-1662）就有過這段許多年輕朋友都可能經歷過的思緒：

「當我思及有限的生命時間
不過是自然界無止境的時間長河中的剎那；

當我冥想偏促生活的空間
僅祇是廣垠無邊空間的一小角落，
我不寒而慄，
同時又為我為何生於此時而不是無窮的他時，
活於此地而不是宇宙另一個處所而訝異不已。」
（巴斯卡：《沈思錄》第205號）

但是「無限」的魅力不僅在於它引導人們進入各種最富創意的想像世界，它同時也在數學與科學中扮演一個不可或缺的角色。莊子所說：「一尺之帛，日去其半，終生不盡」，已含有實數是密集的（dense），指任何兩個實數之間，必然存在著另一個實數的概念；而實數的密集性質正是微積分的基本觀念——極限（limit）存在的先決條件。古希臘芝諾（Zeno）有名的龜兔賽跑悖論（即本書中的阿奇里斯與陸龜賽跑悖論）藉由「無限」次數的迷思而得出兔子永遠追不上烏龜的奇怪結論。這個悖論的一個變種：「飛矢不動」，甚至得出運動乃完全不可能的推論。這裡我們看到，「無限」的概念，不祇是愛好空想的哲學家無聊的思想遊戲，而是與現代的數學與自然科學有極密切的關係。

近代科學中，有那些地方會遇到「無限」？這正是本書討論的主旨。當你看完本書之後，你將會訝異地發現，幾乎近代物理科學中所有主要的理論，都與「無限」脫不了關係。因此，一本討論「無限」與科學關係的書，事實上就是一本介紹近代以來，物理科學所有重大理論進展的書。本書正是以「無限」為軸線，引導讀者進入近代科學各個奇妙領域的導遊。

作者先把讀者帶到悖論的迷宮。古今悖論主要可分兩大類型，一者涉及語句上的自我指涉，如：「我在說謊」，這句話不論真假均會導至矛盾。另一主要類型則「無限」有關。上述「兔龜賽跑」及「飛矢不動」均屬之。本書第一章介紹了第二類悖論，表明「無限」這個概念必須細心對待，否則極易發生矛盾的結論。

首章同時也簡單介紹了康脫（G. Cantor）無限數的理論。一般人容易誤認為，「無限大」就是最大的數，因此「無限大」祇有一個。但是康脫別出心裁地證明「無限大」並不是祇有一個，而是有許許多多個，彼此還可以比較其大小。否定了「無限大」就是唯一最大數量的通俗觀念。

本書接著討論「無限」的時間與「無限」的空間。時間與空間是最

基本的物理觀念，這兩者又容易與「無限」結合在一起。人的現實世界都是有限的，唯有時間的長河可能是無始無終的「無限」久遠；祇有宇宙的範圍也可能是無邊際的「無限」廣闊。因此，談到物理世界與「無限」觀念的交會處，時間與空間無疑是最引人討論的對象。這也是一個哲學家最感興趣的題材。本書介紹了古來多少哲學家對「時間與空間」是否「無限」之探討的精采片段。這裡同時呈現了許多睿智的「奇想」，例如時間是否必然是直線式，或是它可以是一個大循環？宇宙如果「無限」大，每個方位在「無限」遠的宇宙總會遇到恆星，如此每個方向都有星光，整個宇宙應當明亮如晝；可是為何夜間的天空大半方位都是漆黑一片呢？這些有趣的問題豐富地嵌鑲在全書各處，讀來倍覺興趣盎然。

談完了時間與空間，接著就進入近代科學時期（指從哥白尼倡日心說，中間經過牛頓科學革命，而到二十世紀初），所謂古典物理的時期。這時期最主要的科學成就是牛頓力學。但要討論牛頓運動定律，如何描述物體的運動便成了先決條件。從伽利略開始，如何定義速度便困擾了物理學家與數學家。速度的原始意義是度量物體在單位時間內位移的大小，基本上，這是一個平均值。但在研究落體及其他變速運動，科學家要的是在每一個時刻的瞬間速度，而非一段時間內的平均速度。後來科學家終於瞭

解，定義瞬時速度便需要和「無限」觀念打交道。而瞬間速度的數學，正是微積分中的微分。事實上，牛頓之所以發明微積分，就是為了要解決運動與力學問題。

微積分出現，人們立刻發現它威力無窮，用途廣泛，因而大量地應用在各方面的計算中。可是微積分的基礎卻是不穩固的。微分（或瞬間速度）的定義立刻陷入兩個「無限小」相除的尷尬環境。什麼是「無限小」，人們當時都搞不清楚；至於把微分定義成兩個「無限小」相除，那就更加複雜了。這個問題一直到十九世紀下半葉才搞清楚。怪異的是，這之前數學家已應用了兩百年了。

進入了現代物理的時期，冒出「無限」就更加家常便飯了。原子模型穩定問題、黑體輻射古典公式的「紫外災難」，能階數目的「無限大」，所有這些煩人的問題，背後都有「無限」的影子存在。量子力學的出現，可以說是在克服古典物理中「無限」幽靈到處遊蕩而發展出來的。

怪異的量子力學與狹義相對論結合起來，又添加更多「無限」的新難題，但是難題的出現也是偉大發現的契機。狄拉克在這裡發現了電子與正電子的理論。正電子理論上的預言後來居然在實驗中觀察到，成了二十世紀物理學進展的一個重要里程碑，狄拉克解決這個難題，也牽涉到「無

限」的觀念。這個理論的進一步開展，產生了費曼、史溫格及朝永振一郎的量子電動力學，一個物理學上最成功的理論之一。近年來，還應用到基本粒子的各種理論。

當然，二十世紀另一大物理革命——相對論，也是與「無限」觀念脫不了關係。光速作為最高速度，很容易便捲入「無限」的觀念。而物體因加速度導致質量可能變得無限大，在在都有「無限」的影子。書中也加入討論超光速可能發生的因果錯亂的矛盾現象。

而「無限」觀念最迷人之處，在於當應用於宇宙上。除了前面提過「時空」本身的「無限大」的問題之外，黑洞的問題恐怕是最為引人入勝。黑洞的可能性，在愛因斯坦發表廣義相對論方程式不久便被人提出了。黑洞很可能是廣義相對論方程式的一個奇異點的解。作者仔細介紹了關於人們探索奇異點的種種努力；當然，過程中也不斷提及無限的作用。譬如，在接近黑洞之際，地球上的觀測者將發現物體在進入之際時間變得無限地緩慢。作者同時也介紹了最近天文學的重大發展，包括對大霹靂說簡潔的引介。

從古希臘到現代，從哲學家的純然臆測到今日精密儀器的實驗與觀察，從前許多觀念得到了澄清，或被接納，成為科學基本辭彙之一；或被

否定，不再受到科學家及學者關愛的眼光。祇有「無限」這個觀念，兩千年前撲朔迷離，今天還是撲朔迷離。但這並不表示「無限」是個累贅多餘的觀念。相反地，幾乎所有重大的科學新理論，都是在克服某些數量變得「無限」的刺激下發展出來的。沒有「無限」的困擾，也許不少科學理論便不會發展出來。兩千多年也許尚未解決無限的問題，但卻是創造新理論的觸媒。「無限」的概念或許永遠解決不了，但卻是推動人們發展新知識的最「無限大」的動力來源。

前言

當我一開始著手準備這本書的大綱時，我知道我將面對現代物理和宇宙學大部分的主題。當科學家試圖瞭解宇宙的起源以及物理實相時，他們一再遭遇「無限」的概念。早在廿世紀早期，當物理革命發生時，科學家便已經發現他們正不斷地面對「無限」這個惱人的問題，如果不能克服，科學就很難再往前進展。同樣的麻煩一再地發生，當他們試圖瞭解量子機制、愛因斯坦的相對論以及黑洞理論時，「無限」的問題幾乎無所不在。舉個例子來說，如果愛因斯坦的廣義相對論是正確的，黑洞的中心便會壓縮成一個數學上的點，不佔任何空間，而且密度達到無窮大。

宇宙學家已經知道古代哲學家懷疑有無限多個與宇宙的存在是太保守了。新近對於量子宇宙學的認識暗示可能存在無數個宇宙，其中有許多和我們所生存的宇宙相類似，也很有可能存在與我們相似的生命體，甚至有些宇宙可能和我們的宇宙相差無幾。而過去被視為科幻說法的「交錯的宇宙」(alternate universe)也已經變成科學上一個可能的假設。

這並不僅僅是一本介紹近代物理的書，而是述說著自古至今，人類企圖掌握「無限」概念的故事。從這些故事可以發現，今天人們對「無限」的困惑，與兩千年前亞里斯多德時代並沒有改進多少，唯一的差別在於：由於科學家深刻地探討探討宇宙的本質，我們已能從古希臘人所不能想像的角度，窺視「無限」的問題。

我並不打算在這本書中介紹太多描述「無限」的數學。已經有很多書探討過這個主題，「無限」做為一個抽象的數學概念來理解，已經被研究得很深刻了。但是，當「無限」結合到具體的物理世界，事情便充滿了神秘和捉摸不定，在這個情形中，數學理論似乎用處不大。

芝諾(Zeno)是第一個深入探討「無限」概念的古希臘哲學家，在他所提出的悖論(Paradox)中，宣稱行動是不可能的，因為人們永遠無法完成行動中所需要的無盡動作。例如，在某人前進一段距離之前，他必須先到達這段距離的中途點，在這之前，又有另一個中途點等在前方，依此類推，在這個人面前有無窮多的中途點，因此，他絕不可能到達原先預定的終點。乍看之下，芝諾的觀點似乎很難言之成理，然而，有些現代哲學家卻認為未必如此，他們認為在這看似簡單的論點中，其實蘊含著難以估計的深奧思想，在這短短的幾頁前言中，並不適於深入討論這個問題，我祇

是想指出，「無限」的概念早在兩千年前便開始困擾著人們。

直到很久以後，「無限」仍然困惑著人們，伽利略（Galileo Galilei，1564-1642）甚至說這是個根本無法理解的概念，他舉出許多關於「無限」的矛盾性質，並且承認他無法瞭解它。奇怪的是伽利略認為宇宙是無限大的，這位科學革命的始祖也始終認為宇宙有些東西（如無限）是不可理解。

伽利略並不是唯一一位被「無限」概念困擾的科學家，從牛頓到霍金(Stephen Hawking 1942-)都不斷發現自己或多或少必須面對「無限」的概念：牛頓發現自己必須追究到無窮小，才能解決的重力理論引發的問題，但是，他卻根本解釋不清楚到底什麼是「無窮小」，事實上，直到兩個世紀後，困擾這個問題才被解決。

霍金則必須借用他自稱是「虛時間」(imaginary time)的概念，才能避免在研究時間的起點與終點時，出現「無限」的問題。如此可以避免在大霹靂時，空間被「無限地」壓縮。他假定在特定狀態下，時間維度將會出現空間維度的特質。如果真是如此，宇宙將沒有起點，不會有我們熟知的三維空間與一維時間。這終極的起點不存在時間，僅僅存在著四維空間。

關於「無限」的討論，也出現在文學與哲學中。古代斯多噶學派的哲學家認為宇宙必定會經歷過無限個循環，因此，曾經發生過的事件將一演再演，在未來的某個時刻也將必定再次發生，這樣的想法仍為現代人所接受。作家如波赫士(Jorge Luis Borges 1899-1986)便對這種哲學觀深深著迷。在他的一篇文章中曾經提到，與「無限」相遇，將會使我們深信世界本質無非諸般幻象，「無限」將引領我們與「非理性」相接觸，並讓我們知道平素熟知的世界恐非真實。

現代科學家其實也不斷遭遇困擾古代哲學家的同一難題——「無限」。雖然幾千年來，哲學家與科學家費了許多心思研究，但「無限」仍舊神秘如昔。有人可能反對波赫士所說的「世界具有幻象的本質」，但是祇要深入思索「無限」，便必然同意波赫士的說法其實相當精確。大致說來，我已經避免過度深入探討關於「無限」的哲學性或文學性說法，事實上，這本書根本不是一本研究哲學思潮的書，更不是一本文學評論，相反的，它描述了人類與「無限」千年漫長的奮戰。前面幾章將提到一些哲學家，畢竟在古代是他們這些人一直試圖理解宇宙的本質，到了今天人們則多由科學家在做努力，因此，我也將在科學部分多加著墨。

我將依照時間順序組織本書的架構，第一章則稍有例外，目的在為讀

者介紹一些關於「無限」的悖論。為求能完整說明，我也將加入些許數學家對「無限」概念探討的內容。

第一章

充滿矛盾本質的無限

THE PARADOXICAL NATURE OF INFINITY

某位棒球球員荷姆死後上天堂，由於他生前最愛棒球，因此上帝特許他今後可以天天打棒球直到永世，換句話說，他要參加無限次的棒球賽。如果，上帝更進一步指定荷姆的全壘打率是一成，意味著平均十次安打中會有一支全壘打，這樣一來，上帝可能會這樣跟這個名叫荷姆的球員說，「你將會有無窮次的打擊，其中有無窮次的全壘打。」

上帝並沒有規定荷姆在每揮完九棒之後，下一棒就一定會擊出全壘打，這樣會讓所有的樂趣都消失殆盡。荷姆可能要揮棒二十次以上或者更多，才能把球打出球場一次，偶爾，他也可能每次揮棒都擊出全壘打，但是，長期累計下來，荷姆將會發現他的打擊率將會相當靠近上帝一開始指定的一成全壘打率。

無限多場球賽！很明顯的，自然需要無限多顆棒球，由於上帝可能不願意每當荷姆需要球時，都得顯現一次造物的神能，所以，上帝乾脆在每隊的休息室中都放個可以無限供應棒球的木箱子，永不耗盡，無論從無限中取用多少，都無損於無限。

荷姆是個強打者，他隊上的投手卻不見得是，事實上，上帝跟他開了個小玩笑，無論他上場打擊幾次，都將以掛零收場。有一天，出乎大家意料之外，這位選手突然連續擊出兩支安打，一開始時，每個人都覺得這是

不可能的事，但上帝不可能欺騙這位選手。然而，有另一位名叫尤基的選手恰巧也是個哲學家，馬上就得出結論：如果這位選手在無限次的比賽中，祇能擊出有限次的安打，他的打擊率將會是〇·〇〇〇，尤基解釋道，任何有限的數字被無限大相除，結果都將會是零，用無限大來除二，將會是零，來除兩百、兩千、甚至兩億，都必然是零。

「這是因為一個結束了，另一個還沒有。」尤基補充說。並不是所有人都相信這種玄妙的分析，就有人低聲抱怨說，「這怎麼可能？怎麼能用無限大來除一個數字呢？」

荷姆的球隊正在巡迴賽的途中，必須找個旅館休息，他們從不用煩惱必須事先訂位，天堂的旅館就是有這個好處，總是有無限多的房間隨時可用。然而，有一天，荷姆的球隊赫然發現即將住進的旅館掛出客滿的牌子，這裡已經住進了無限多的客人。遇到這種情形時，一開始總是會找找看有沒有其他選擇，但是，負責管理旅館的守護天使很快地便確定了不用這麼麻煩，旅館雖已客滿，但是祂仍舊保證每位球員都會有房間住。祂首先問清楚整個球隊共有四十人，便把客人房間號碼向後挪移四十號，原先住在四十二號房的客人，現在的房間號碼是八十二號。當守護天使把鑰匙一一點交給球員時，祂對自己喃喃自語，「這有什麼難的呢？如果有必

要，我還可以再容納無限多個新客人。」祂的確可以，如果他把一號房客挪到二號，二號房客挪到四號，三號房客挪到六號，這樣一來，所有奇數號房間都將空出來，當然就能再容納無限多位客人。

看起來，無限數（如果這也稱得上數字的話）是個矛盾的東西，你可以很輕易地設想一個有著無限多場賽事的球季，和一個可以容納無限多客人的旅館，這些在現實生活中都不可能存在，我企圖要將這點標示出來，現在讓我們來看看其他關於「無限」的矛盾本質。

如果荷姆每十支安打中就會有一支全壘打，這樣一來，全壘打數和安打數將會一樣多。似乎不可思議，但是很容易瞭解，祇需將全壘打數字與安打數字一一配對，由於數字永無盡頭，因此，將不會看到多出來的安打數。

如果用視覺形式來表達，一樣清楚。如果我用正整數與正整偶數來配對，將會出現這種形式：

1 ⇔ 2

2 ⇔ 4

3 ⇔ 6

4 ⇔ 8

5 ⇔ 10

6 ⇔ 12

…… …… ……

雙箭頭直線表示一一對應的關係，這樣的序列將無窮延伸下去。

乍看之下，似乎有點奇怪，事實上，這在邏輯上完全成立。將一堆物體和另一堆物體對應起來進行比較，是計數的最根本形式，無須學過代數也可以瞭解。

再換個例子談談，有個小女生想要知道媽媽留在桌上的茶杯和茶碟的數目是否相同，可是她根本還不會數學、不會計算，那怎麼辦呢？其實很簡單，祇要把茶杯放進碟子中，如果到最後，茶杯和碟子都沒有剩下，那就知道兩者數目相同。

1	⇔	1
2	⇔	4
3	⇔	9
4	⇔	16
5	⇔	25
6	⇔	36
……	……	……

即便我們知道正整數的數目比正偶數要多上一倍，但是，我們仍然將兩個無限大的數字視為一樣。事實上，還有許多很極端的例子，比如說在一六三八年時，伽利略發現，正整數數字的個數與平方數的個數一樣多。

當他發現這件事實時，伽利略驚覺所謂「無限」之中必有玄虛，並且最好少碰為妙，「這是全然不可理解的。」他說。伽利略並不是第一位或唯一一位獲致類似結論的人，在更遠早的時代裡，已經有人注意到這種不相等卻能對應的無限數列，即便是在伽利略去世後的好幾個世紀，數學家仍然不願承認「無限」具備數學意義。數學家的確運用到無限數列，最簡單的例子就是從1，2，3開始，一直數下去，就是一個無窮數列，另一個例子則是1—2，1—4，1—8……等以2的平方為分母的數列，這些就好像是裝了永備電池的邦尼兔子，就是不停地跳、跳、跳，不知何時方休。但是即便有一個例如像是1，2，3開始數下去的「無窮數列」，仍然祇是接近無限大，而絕非真的是無限大。

無限數

「無限」的內涵一直困擾十九世紀末葉以前的數學家，直到一位德國數學家康脫(Georg Cantor)在一八七四年至一八八四年的十年間出版了一系列的論文，證明了無限可以透過嚴密的數學方法加以處理。他首先定義「無限」可以與本身的一部分產生一對一對應關係，例如像是前述的正整數對應正整偶數，或是正整數對應平方數。從這點，我們不難發現，根據

康脫的定義，1，2，3的數列正是一組無限的集合。除了將無限定義出來之外，康脫更得出了一些令人驚訝的結果。例如他證明出正整數的個數正和真分數與假分數個數的總和相等。要證明並不難，祇須將以下一對一的對應關係列下來，即可看出：

1	⇔	$\frac{1}{1}$
2	⇔	$\frac{2}{1}$
3	⇔	$\frac{1}{2}$
4	⇔	$\frac{1}{3}$
5	⇔	$\frac{2}{2}$
6	⇔	$\frac{3}{1}$
7	⇔	$\frac{4}{1}$
8	⇔	$\frac{3}{2}$
9	⇔	$\frac{2}{3}$
10	⇔	$\frac{1}{4}$
……	……	……

下方數列包含所有的真分數與假分數，不會遺漏任何分數。康脫把所有分數從分子與分母和為2開始列出來，即1—1；他再把分子與分母和為三的分數列舉出來，分別為2—1、1—2；他再將分子與分母和為4的列出來，發現可以列出三個；分子與分母和為5的分數可以列出四個，如此延伸下去，直到無窮。

康脫還有些其他關於「無限」的發現，結果著實令人驚異。例如，他在一八七四年試圖證明一條直線上的點的數目少於平面上的點的數目，或是任何維度空間中的點的數目，（註：數學家所講的「空間」常是超過三

個維度，事實上，他們有時會用到無限多個維度。然而，我們不應認為這些抽象的數學空間和日常物理世界的三度空間有任何關聯。前者，純粹祇是數學上的建構。）其答案竟是相反：一條直線上點的數目竟然和一個平面上點的數目相等！同時他也發現無論在任何維度的空間裡，點的數目總是相同，「我證明出來，但我並不相信。」康脫在一八七七年寫給另一位德國數學家德得金(Richard Dedekind)的信中，道出這樣的懷疑。

然而這些結果也並未暗示所有的無限數都相等，全然不是這麼回事。例如，1，2，3延伸下去所組成的數列，並不能與一條直線上的點形成一一對應的關係，直線上的點要多得多了。雖然兩者都是無限，但是數線上的點要比正整數的個數要多出許多。

最後，康脫證明出存在著無限多個不同大小的「無限數」，他以$\aleph_0$代表這個無限數列中最小的一個無限數，代表正整數的個數。$\aleph$是希伯來文第一個字母，$\aleph_0$的念法為阿列夫・零「aleph-null」，次大的數便為$\aleph_1$，如此無窮延伸下去，便成為現代通用的數學符號。

可預知的，康脫的發現並未立刻為數學界所接受。很多人根本就避免一起用到「無限」的概念，而康脫卻在大談「無限數」的存在（而且還有無限多個不同的「無限數」存在）。一位曾教導過康脫的數學教授，克隆

內克(Leopold kronecker)，便極力批評康脫的發現。他批評康脫的發現是數學上的癲狂，其後更阻止康脫取得柏林大學職位。另一個著名的法國數學家潘加蕾(Henri Poincare)描述康脫的「無限」理論是「後代子孫將視之為最嚴重的疾病」。

這些攻擊對康脫的情緒造成不幸的影響，先是產生偏執症狀、幻想有人對他施展陰謀，他拒絕唯一一本肯接受他作品的數學期刊，原因是他懷疑編輯正參與一項反對他的陰謀。他在一八八四年歷經一次嚴重的精神分裂，痊癒之後，他放棄研究數學，轉而在哲學期刊發表文章。在康脫的餘生中，又歷經了幾次憂鬱症與精神分裂，他最終還是被解除在哈雷(Halle)大學的教職，並於一九一八年在精神病院中過世。

正當此時，一位年輕數學家開始認識到康脫作品的重要性；一九二六年，偉大的德國數學家希伯特(David Hibert)總結他對康脫作品的看法，「沒有人可以將我們從康脫一手創建的天堂裡驅離。」希伯特如此說，然而此時，康脫已去世八年之久。

阿奇理斯與陸龜

我並不準備詳細討論康脫對於無限數的理論，這個理論恰好是所謂

「純數學」的一個例子，在自然科學中很難加以運用。例如在物理學上就用不上這種無限數，在其他科學領域也差不多。我介紹這個主題的用意僅是在說明，不管「無限」概念多麼充滿矛盾，仍然可以透過堅實的邏輯基礎來理解，再沒有人可以像克隆內克那樣全然拒絕接受「無限」對於數學的影響。這使得在其他非數學領域接觸到「無限」概念時，更覺困惑。當遭遇無限數量的時候，我們無法以不合邏輯或是自相矛盾為藉口拒絕接受，我們也不能像伽利略那樣輕描淡寫一句「這是全然不可解的」，就想脫身。當我們遭遇「無限」時，我們該做的是仔細研究它，並且盡可能想出使用「無限數」的方法。

在現實生活中，很難有機會遇見無限，沒有任何東西擁有無限的速度；天上星星的數目也並非無限，就算是海灘上的沙子數目也不是無限，可是人們總在哲學思考上、在現代科學中以及偶而會在文學裡不斷遭遇無限的概念。在日常語言中，「無限」經常被當作「超出人類理解能力之外的事物」的同義辭。然而在哲學或科學的脈絡下，遭遇「無限」時，就不能這般輕易帶過。哲學和科學畢竟總是要想盡辦法瞭解這個世界所有的事物。

使用「無限」這個概念，最早也是最有名的例子便是「阿奇理斯與

陸龜」的悖論(Paradox of Achilles and the Tortoies)，據說這是在西元前五世紀左右的古希臘哲學家芝諾所提出來的。他是這樣說的：有一天，強壯的古希臘戰士阿奇理斯要和行動遲緩的陸龜進行一場賽跑，由於陸龜的行動實在太慢，阿奇理斯便禮讓陸龜一段距離。比賽開始，結局似乎很明顯，然而芝諾卻說，阿奇理斯將永遠無法勝過陸龜。他解釋道，如果阿奇理斯要勝過陸龜，必須先跑完他禮讓陸龜的那一段路，在這段時間中，陸龜又前進了幾步，所以當阿奇理斯抵達當時陸龜的起跑點，陸龜仍舊在阿奇理斯前方。芝諾說，事情很明顯，當阿奇理斯抵達陸龜的前一個起點，陸龜必然在他之前，如此不斷繼續下去，無論兩者距離有多短，陸龜總是會在阿奇理斯之前。

不變的一

從常理來看，誰都知道阿奇理斯很快便可以超前陸龜，但是芝諾的重點並不在此，就算阿奇理斯可以超前陸龜，也不能據以駁斥芝諾的論證。芝諾要說的是，在超越之前，阿奇理斯必須完成無限個動作，然而這卻不可能在有限的時間內完成。如果我們不能接受芝諾的說法，我們必須找出其中謬誤之處。

在繼續討論芝諾的悖論之前，最好先來談談這個悖論是在怎樣的背景下提出。當芝諾在構思「阿奇理斯與陸龜」以及其他悖論時，他並不是祇想弄出一些有趣的怪異想法，相反地，他的目的相當嚴肅。芝諾是哲學家帕門尼迪斯(Parmenides)的弟子，帕門尼迪斯認為整個實相世界是個不變的整體，他稱這是「不變的一」。帕門尼迪斯說，運動、變化與多樣性都祇是幻象，相信這些是真實的人是被幻象與感官所欺蒙。帕門尼迪斯的說法與某些東方哲學家的看法相當類似。比如說印度教便認為整個感官世界是一個大幻象。雖是相類似，不過還是有個極明顯的差別，帕門尼迪斯認為透過理性思索可以觸及世界的本質，而不是經由東方哲學家慣於接受的心靈冥思的途徑。

帕門尼迪斯被視為是第一位理性主義者，就是說，他是一位憑藉理性思索指引方向的哲學家，即便理性思索的結果與一般常理大相逕庭，他也會欣然接受。帕門尼迪斯的想法似乎影響柏拉圖，柏拉圖因此寫下取名《帕門尼迪斯》（*Parmenides*）的一篇對話錄，記錄這位年輕蘇格拉底信徒對帕門尼迪斯這位老哲學家的敬畏之意。可預期的是，帕門尼迪斯的思想在當時受到不少的嘲諷。據傳，芝諾發明這個悖論是為了替他的老師辯護。

很不幸地，芝諾自己的著作都佚失了，他著名的悖論，我們祇能從亞里斯多德的轉述來瞭解其內容，而亞里斯多德引用芝諾作品的目的卻是為了要用來作為駁斥之用。可想而知的，亞里斯多德轉述芝諾的悖論是輕率而隨興的，因此，我們看不到芝諾悖論的原來面目；從而，我們無法確認芝諾提出這個悖論是為了表達什麼觀點。總而言之，根據亞里斯多德的描述，芝諾提出了「阿奇理斯與陸龜」以及另一個「二分法」的悖論，是用來證明運動是不可能的，這是不是芝諾的原意，已無法加以確認了。有些學者認為芝諾是在質疑時間與空間可被無窮細分的概念，而他的重點在於描述一個荒謬的狀況：阿奇理斯必須跑完一連串越來越短的路程，這意味著空間不能用這種方式來分割。芝諾的觀點中使用了大量的邏輯觀念，如果空間可以無止盡地一分再分，這樣便和帕門伊迪斯認為萬物歸於一的觀念相違背。憑誰都很難相信可以分成無限多部分的事物，可以歸結成「不變的一」。

亞里斯多德認為芝諾是發明辯證法(Dialectic)的始祖，在柏拉圖的對話錄中也經常可以看到這種對話形式，在這些作品中，經常可以發現蘇格拉底要求其他人發表意見，然後再證明這個意見可以推導到完全相反的結果，或是得到極其荒謬的結論。（註：證明從一個概念會推導到矛盾結

論的辯證法，和蘇格拉底詰問的方法並不相同。蘇格拉底常結合這兩種方法。」很明顯地，芝諾在「阿奇理斯與陸龜」這個例子中用了辯證法：每個人都知道阿奇理斯很快就可以超前腳步緩慢的陸龜，因此芝諾最初的假設，必定有什麼地方出了問題。

我們瞭解芝諾提出悖論的原因，不見得有助於瞭解這些悖論的內涵，如果我們真想瞭解，我們必須深入探索悖論的本身。為了讓問題簡單一點，我們假設阿奇理斯跑步的速度恰好是陸龜的兩倍。這聽起來有點不合理，不過，可能那時候阿奇理斯剛打完一場特洛伊戰役，累得要命；這隻陸龜如果不是世界上跑得最快的陸龜，他根本就不會去挑戰阿奇理斯。我們做這樣的假設絲毫不會改變悖論的性質。不管阿奇理斯跑得比他對手快兩倍，或十倍，或五十倍，原理都是一樣的。

然後，我們進一步假設陸龜的起跑點正在阿奇理斯前方十公尺，阿奇理斯祇要一秒鐘就可以完成第一步驟的比賽，即到達陸龜最初的起點。在阿奇里斯跑的這段時間，陸龜又前進了五公尺，為了要趕上這第二步驟，阿奇里斯要花上半秒鐘；第三步驟則需四分之一秒；第四步驟需八分之一秒，以此類推。

如果用表格來表示，就會變成這樣子：

步驟	1	2	3	4	5	6
所需時間（秒數）	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{32}$

如果我們把每個階段經過的時間加起來，可以得到另一個數列：

步驟	1	2	3	4	5	6
所需時間（秒數）	1	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$	$1\frac{7}{8}$	$1\frac{15}{16}$	$1\frac{31}{32}$

我們可以發現時間總和越來越接近兩秒鐘，事實上，阿奇理斯也確實祇要這些時間就可以追上他的對手。如果阿奇理斯的速度是陸龜的十倍快，也是類似的結果，祇是阿奇理斯趕上陸龜的時間就縮得更短了，大約是$1\frac{1}{9}$秒左右。

乍看之下，祇需要一點點簡單的算術，芝諾的悖論似乎很輕易就被破解了，但經過一番思索，會發現事情並沒有那麼簡單。芝諾並不是說阿奇理斯沒有辦法在有限的時間裡追上陸龜，他很清楚如果把這兩個主角放在

一起比賽會發生什麼事；芝諾真正要表達的是阿奇理斯沒有辦法做完無限個步驟。

二分法

這個名為「二分法」的悖論（Dichotomy）（這個名字據說是後來的評論者加上的，而非芝諾自己取的）和「阿奇理斯與陸龜」的悖論是類似的性質。根據芝諾的說法，旅行是不可能的。因為如果要到某個地點去，旅行者必須先走完一半的路程，而走完這一半的路程之後，還有一半路程在前方等候，如此一來，無論旅行者如何接近目的地，都還是會有一點點未完的旅程。

芝諾甚至說，更嚴重的是連開始都有困難，畢竟，要進行後半段的路程時，必須先完成前半段的路程，然而，在此之前，必須先完成前四分之一的旅途，依此類推，直到旅行最初開始。

這兩種悖論的形式完全一致，是彼此的鏡像。在第一個形式中，芝諾把距離分成越來越小的部分，如果用分數數列表示，則可得到無限數列1，$\frac{1}{2}$，$\frac{1}{4}$，$\frac{1}{8}$，$\frac{1}{16}$……；在第二個形式中，則是由較小的分數開始遞增，……$\frac{1}{16}$，$\frac{1}{8}$，$\frac{1}{4}$，$\frac{1}{2}$。

如果我們將這些分數加起來，便會得到這個算式：1－2＋1－4＋1－8＋1－16＋……，加入越多項，總和越接近1。正如同在阿奇理斯的例子裡，時間總和越來越接近兩秒一樣。芝諾要表達的是，無論要前進多少距離，都必須經過無限多次的步驟。

據說當芝諾將這個悖論拿給犬儒學派(Cynic)始祖戴奧奇尼斯（Diogenes 412-323B. C.）時，戴奧奇尼斯以起身走開的方式，駁斥了芝諾的悖論。不過這個故事很可能是虛構的，芝諾其實早在戴奧奇尼斯出生前十七、八年就過世了，所以兩人絕不可能有任何碰面的機會，更不用說曾發生戴奧奇尼斯以起身走開的動作。芝諾也很清楚人們一般情況下都可以行動自如，他要問的是：這如何可能？

芝諾的悖論並不像想像中那樣容易駁倒。乍看之下，像個異想天開的小謎題，但如果詳加檢視，這個悖論變得非常神秘。英國哲學家羅素(Bertrand Russell, 1872-1970）在一篇大約寫於一九二〇年代的論文中，表示芝諾的論證是「不可思議的深刻與精巧」；而另一位廿世紀的哲學家則用了相當多的篇幅來論證它。這些哲學家可分成兩大陣營：一派認為這根本不能構成哲學上有討論價值的問題，另一派則認為芝諾的悖論至今尚未解決。芝諾在兩千五百年前提出的悖論，迄今仍困擾著一些當代最富思想

深度的知識份子。

非理性的隙縫

阿根廷作家波赫士從芝諾的悖論發展出他的虛幻文學。他在廿世紀中期的作品《陸龜的化身》（*Avatars of the Tortoise*）中談到世界的虛幻本質，「我們幻想著這世界在空間中可知覺的、穩固的、神奇的、遍有的存在，在時間中具有持續性的存在，但是在構築世界的架構中，我們卻允許一丁點揮之不去的非理性的隙縫存在。這個非理性卻告訴我們，這世界的架構是錯誤的。」波赫士提到的「非理性隙縫」，其中正包含了芝諾的悖論。波赫士深深著迷於無限的概念，他的許多作品中也提到這個概念，並以「數不盡的九頭蛇怪」當作譬喻。波赫士曾經提過他很想寫一部關於無限的作品，但是凜於必須同時具備形而上學、神學以及數學的背景，終未成筆。

英國作者 G. J. 惠特羅（G. J. Whitrow）則從另一個方向出發，在他一九六一年的作品《時間的自然哲學》（*Natureal Philosophy of Time*）中，他借用芝諾的原始概念，並且進一步發展成更具神秘意味的形式。惠特羅在他的作品中要求讀者去想像一個不斷反彈跳躍的球，每次跳躍的高度恰

好是前一次的四分之三。由於球反彈的高度越來越低，因此每次跳躍所需的時間也越來越短，正如同在芝諾悖論中時間與行進距離越來越短一樣，其中唯一的差別就是惠特羅以四分之三為比例，而芝諾則採用二分之一。證明在適當的初速度之下，這個反覆彈跳的球將在四秒鐘之內反覆彈跳無限多次。

就算球彈起的高度不是四分之三，其實也沒有什麼不同，頂多祇是時間改變而已。在現實生活中，不存在可以彈跳無限多次的球，也沒有什麼球是標準的球體，地板也不可能是完全平滑，在高倍顯微鏡底下，兩者的表面也是粗糙不已，摩擦力不斷作用，更不可能有無限次的跳躍。事實上，當我在自家廚房地板上用乒乓球實驗的說法時，乒乓球大約彈跳個二十來次就滾到洗碗機底下消失了。縱使如此，無限多次彈跳在理論上依然存在，反正，球早晚會跳到無限多次的。更且，在四秒過後，我們也不容易明確知道球會如何？（註：這裡就有個奇怪現象：如果球能夠彈跳無限多次，那不管它已經彈跳了多少次，未來它還是一樣地會繼續彈跳無限次。）是不是球會以無限小的速度向上、向下，還是根本停止？

似乎在現實世界的環境下，很難討論無限的概念。借用康脫提出的「無限數列」概念也無助於駁倒芝諾的悖論，或是說明彈跳不已的球。康

脫提出的理論祇告訴我們1—2，1—4，1—8，1—16……可以和正整數數列1，2，3，4……做一一對應，而兩個無限數列是一樣大小的。這個理論對於現實世界的物體之行為根本無法做出任何解釋。縱使康脫讓我們知道「無限」並不是沒有意義的，他的理論看起來仍然很奇怪。這個理論祇會使我們更困惑，幸而在現實生活中，我們不常遭遇「無限」。

時光流逝

美國哲學家詹姆士(William James)創造了他自己關於芝諾「二分法」悖論的版本。他說，「十四分鐘將不會結束」，因為必須先過完七分鐘，而過完七分鐘前，必須先過完三分三十秒，就這樣推演下去，甚且，這可以推演出芝諾還沒過世，因為在芝諾過完一生前，必須過完半輩子，以及前四分之一生等。然而，世間事似乎並非如此如意。

芝諾的後半生在他的出生地伊里亞城(Elea)，從事政治活動。據說，暴虐的城市統治者把芝諾折磨至死，而芝諾英勇地承受。我們不能確定這個故事是否正確，因為光是芝諾的死法和國王的名字就有多種不同的版

本。

貝比（我們的棒球選手荷姆生前便有這樣的綽號）在天國洋基隊巡迴比賽中途的短暫停留中，曾和中途的旅館有過這樣的爭議：如果貝比在週一點亮房間裡的燈，週二切熄，週三再點亮，如此下去，那麼在無限多次的開開關關後，燈的最後狀態應當是熄滅的；旅館方面則認為最後的狀態應當是亮著的，而他們彼此間似乎都不能理解對方的立場。

我們的棒球哲學家尤基聽到他們的爭論時，他正巧在旅館迴廊裡散步。他之前已經聽過他們就這個問題爭論過許多次，在未來也將繼續爭論下去。他聽了一會，確定他們又在爭論同樣的話題，他決定不介入，並轉向另一個方向。當他走開時，口裡還唸唸有詞道：「這似曾相識」。

之後，當貝比走下旅館迴廊，他突然有個可怕的想法，他正在進行的比賽永無止境，而在球賽中會出現的狀況卻是有限的，如果他擊出球，就祇會有六種情形等著他：一壘打、二壘打、三壘打、全壘打、界外球，或是接殺。如果跑壘者懶得盜壘，情形就更單純，要不就是安全上壘，要不就是出局。有限的狀況彼此組合起來還是有限，而他必須參加無限多次的球賽。

突然，貝比的緊張神情又轉成笑容，「不！這不會是真的！」他想著。在每一局中，祇要不到三人出局的局面，打擊的球隊可以有任意數目的打擊次數，事實上，有無限多的可能性，可是他又發現自己陷入迷惑之中，這是不是意味著終究會碰到一局永遠打不完的球賽？

第二章

無限的時間

INFINITE TIME

英國數學家道奇森(Charles L. Dodgson)用卡羅的筆名(Lewis Carroll)把芝諾的悖論寫進《陸龜對阿奇理斯說的話》(*What the Tortoise Said to Achilles*)的寓言故事中。在故事裡，阿奇理斯與陸龜正討論一個幾何學上的簡單定理。這個關於三角形的定理包含幾部分：

(A)和某一特定事物相同的事物，彼此間也必然相同。

(B)三角形的兩邊相同於某一特定線段。

(Z)這三角形的兩邊彼此相同。

對阿奇理斯來說很明顯，如果A與B是正確的，Z自然也是正確的。陸龜則不做此想，陸龜說，他接受A與B，但Z未必正確。為了要讓Z成立，必須再加入另一項條件：

(C)如果A與B為真，則Z為真。

這樣一來，陸龜總能接受結論了吧?其實不然，陸龜又說話了，他可以接受A、B與C，但是Z未必成立。所以阿奇理斯再加入新的陳述句：

(D)如果A、B與C為真，則Z為真。

猜得沒錯，陸龜不是那麼好對付的，事實上直到故事結束時，阿奇理斯已經又多寫了幾千個陳述句了，而陸龜的評論則是：「還有幾百萬個在等著呢！」

卡羅寫作這篇故事時並不是故意要讓故事變得這麼詼諧可笑，事實上，故事中還用了幾個相當無趣的雙關語，例如陸龜在故事中的化名叫做「魯詭」，阿奇理斯則是「阿氣你死」，然而這個故事不失為證明無限回歸(infinite regress)根本行不通。陸龜錯在將陳述句的數目太過輕描淡寫，豈止幾百萬，不管阿奇理斯加了多少個陳述句，總還是可以再多一個，這樣那有個完?

通常，祇有在哲學論戰中，才會碰到這種無限回歸的推演，尤其是在試圖證明上帝的確存在的論題上。亞里斯多德「證明」上帝存在的理由是上帝是推動萬物運動的第一因(First Mover)。亞里斯多德的說法是這樣的：萬物都在運動中，而這都是由其他事物所推動的，A物之所以在動，必然因為受某D物所推動，而B物又是由某C物所推動，這樣推演下

去，一定有個最初的推動者，這個最初推動者就是上帝。

亞里斯多德並不是說上帝讓宇宙開始運動，在他的哲學觀中，驅動力必須持續施予，否則運動將會停止。舉個例子來說，當石頭離開投擲者的手後之所以會繼續飛動，並不是和動量有關（在亞里斯多德的時代還沒有動量的概念），而是因為石頭被經過的空氣的運動所推動。當空氣的運動不足以推動石頭繼續飛行時，石頭便垂直掉落。（註：事實上，石頭是沿拋物線飛行，不會如此垂直掉落。亞里斯多德如果打棒球，一定接不到高飛球。）同樣地，如果當最初推動者不存在，則世間所有運動也將停止。

這些論點日後成為羅馬天主教神學理論的一部分。在十三世紀時，聖湯瑪士・阿奎納斯(St. Thomas Aquinas 1215-1274)寫下《神學概論》（*Summa Theologica*），其中將亞里斯多德的理論與天主教的教義結合，聖湯瑪士一再地重複最初推動者的論述。事實上，聖湯瑪士提出五項證據來證明上帝的存在，其中有兩項是「最初推動者」論述的變種。他提出的「最初原因說」(First Cause)指出，所有發生的事件都必然事出有因，但是不可能永無止境地追溯回去，總是會找到「最初原因」，在另一項論證中，他說一定有一個萬事萬物的起源。

以現代科學的角度來看，這些理由都缺乏說服力，科學家可能相信，也可能不相信神，但不論他是否相信，都不可能接受聖湯瑪士的說法。亞里斯多德說，如果沒有持續地施予力，物體終將停止，然而我們知道物體的自然狀態就是運動，以牛頓的運動定律來看，在不施予外力時，動者必然恆做直線等速運動。同樣的，聖湯瑪士的「最初原因說」在現代的量子力學看來根本站不住腳。根據已經普為接受的量子力學，個別的次原子粒子將以不可預期的方式運動，更有許多隨機的、不受外力就會運動的事件。

另外一些關於無限回歸的論證就不是那麼容易推翻，在康德(Immanuel Kant)的《純粹理性批判》(*Critique of Pure Reason*)一書中曾提及，假定時間無限延伸是件荒謬的事。如果在目前時刻之前，曾經歷過無限長的時間，則必然發生過無限多的事件，然而這絕不可能。

康德並未嘗試證明時間有限，事實上，他舉出另外一個論證，似乎會導至相反的結論。他相信他可以證明時間的有限性，也可以導出矛盾的結論：時間無起點，因為如果時間有起點，那麼人們要問這點之前是什麼；同樣地，時間將不會有終點，因為在那之後，又是什麼。康德試圖證明：因為時間既非無限，亦非有限，所以時間不是外在世界的性質之一。相反

的，時間應當是人類內在心智的屬性。

我無意引申德國唯心主義哲學的理論，祇是想舉例說明無限回歸的論證，尤其是應用到時間的屬性上。早從遠古開始，人類便不斷爭論時間是否有限，即使到今日，仍無定論。現在的人多半相信時間起自於大霹靂，而時間是否將終結，則毫無所悉。

任何人祇要開始思索時間的本質，就必然碰觸到「無限」的問題。「無限」與「永恆」是兩個極接近的概念，因此，我很願意回頭看看在不同歷史時期中對於時間的討論。其中一個原因是：某些最遠古的想法，竟和現代的觀念相似。例如，在古希臘對於時間的某些想法就和最新的宇宙學理論頗為接近。

循環的時間

亞里斯多德堅信世界一直都存在，乍看之下，這是個令人驚奇的陳述，因為在「最初推動者」的論述中，他曾訴諸「無限」回歸的不可能性。他也明白地否定「無限大」這個數目的存在。亞里斯多德說，祇有潛在的無限大（potential infinity）會存在。

什麼叫做「潛在的無限」呢？正整數的集合是一個很好的例子。1，

2，3……這個正整數集合不可能是有限的，不管是多大的數，都不可能是最後一個數，因為你祇須把那個數加一，就會得到另一個正整數，而且比原來的數大（大一）。因此，正整數的個數是無限大的。但這個「無限大」不可能真正得到，亦即並不實際存在，祇是「潛在地」存在。這就是亞里斯多德所謂「潛在的無限」的意義。

既然如此，亞里斯多德為什麼會認為過去的時間是無限的？事實上，亞里斯多德並不如此認為。在亞里斯多德的想法中，時間是圓環狀的。亞里斯多德接受一個在遠古盛行的概念，即宇宙循環（cosmic cycle）。我們慣於認為時間是從古時延伸至未來的直線，但這並不比認為時間是循環狀來得自然。實際上，大部分的自然現象都是循環反覆的。我們都經歷過日與夜的交替、月的盈虧圓缺以及季節的推移。

許多不同的文明都有循環時間的概念。在印度教中，人們相信時間是一個大的循環，世界周期地歷經成住壞空。在吠陀時期（大約是西元前一千五百年到六百年之間），印度聖者更細分大循環中有小循環。最小的循環是一劫，相當於人類的三百六十年，而最大的循環則大約是三百兆年，相當於神的壽命。

中國古代相信在宇宙之間的陰陽循環互動，算出一個循環是兩萬三千

六百三十九年在美洲，阿茲特克人(Aztecs)和馬雅人(Mayas)相信循環的時間以及反覆出現的大災難。根據阿茲特克信仰，每五十二年，世界便有毀滅的危險。在北歐神話中，也可以找到類似的想法。根據北歐神話，世界與天堂都將毀於神與巨人之間的戰役中。世界將被重建，而新的神與新的人類也將出現，如此的循環將一演再演。

大災之年

在古希臘，人們廣泛相信有所謂「大災之年」的循環：每經過數千年，太陽、月亮以及五個當時已知的行星將會回歸到初始狀態，而時間便完成了一次循環。每一次的循環中都會有一次「大惡冬」，在大惡冬時期，世界將被洪水與豪雨所淹沒，其後則是「大酷夏」，萬物皆毀於烈火。

許多相信循環時間論的人都相信歷史將會重現。總是會有另一次特洛伊戰，另一個雅典，甚至會有另一個喝下毒藥的蘇格拉底，這是畢達哥拉斯學派（Pythagorean）信徒倡言的教義之一。柏拉圖的作品中亦有類似的說法，在柏拉圖的對話錄《帕門尼德斯》（*Parmenides*）中提到，事物變老的同時，也變得更年輕，因為在循環狀的時間中，向前推進一步，既

是變老，也是向時間的起點接近一步。在亞里斯多德的《問題集》（*Problems*）中，也提過相似的說法，書中曾論及特洛伊戰爭，提到如果時間是循環狀的，那麼特洛伊戰爭既存在於過去，也存在於未來，這其實未必是亞里斯多德真正的想法，現代學者相信這部《問題集》是在亞里斯多德去世後許久，才編撰出來。

如果時間是循環狀的結構，過去就不會發生過無限多的事件。經歷過時間的循環好比是環遊地球一圈，總是會回到一開始的起點，更不用說無限多次的循環了，反正總是會一再重複。

亞里斯多德並不相信過去發生過的事會再次精準的重現，或是同樣的人會在未來重生一次，但他也引用了「大惡冬」以及大循環的概念，他也相信人類歷史將循一定的模式再現。

對現代人來說，如果過去發生的事不會再次重現，實在很難讓人相信時間是循環的。但或許我們應該記得我們會用類似的說法來談論時間，例如我們經常說在每天「同一個時間」起床，或者說在某個特定的時間上班、吃飯或是就寢。亞里斯多德使用相同的概念，祇是尺度更巨大而已。他認為，在某個長的時間循環中，會有相同天體運動出現，如同我們每天會在某個時間吃飯睡覺一樣。

斯多噶學派

儘管亞里斯多德表示懷疑，不過相信事件會反覆發生的論點仍影響深遠。因為這是斯多噶學派（stoicism）的基本教義之一。斯多噶學派雖然起自於希臘，但是在羅馬人之間也相當流行。實際上，斯多噶學派和宗教有相當類似的地方。這沒什麼好奇怪的，古時候，宗教和哲學之間的關係本就相當密切，柏拉圖的作品中就有相當濃厚的宗教意味，而在古羅馬時期，人們也慣於向哲學尋求生活行為的準則。

斯多噶學派起於西提姆（Citium）的芝諾（Zeno）（和在伊里亞提出悖論的芝諾並非同一人），他幾乎沒有留下任何完整著作，僅有一些斷簡殘篇。即使如此，我們還是可以相當清楚地描繪出芝諾的思想。有趣的是，芝諾似乎並不想獨自發展一套哲學理論，他反而是致力於蒐集足以代表「時代智慧」的種種理念。從而，整理出一套歷經數世紀而不墜的哲學。在芝諾身後五百年，羅馬人還受斯多噶學派影響頗深。

芝諾相信，過去的事件將再度發生，當時間到了盡頭，整個宇宙會毀於大火，並在灰燼中重生。一開始時，火是唯一的存在。慢慢地，火會凝結成空氣、再變成水，地球將在水中慢慢形成，直到再次毀於大火

為止，從今日知識看來，這似乎是荒誕的自然變異，但在當時看起來卻很合理，因為它把當時公認為宇宙構成的四元素——地、水、風、火——看成是可以相互轉換。

斯多噶學派存在的時間延續幾世紀，因此，很自然地也會隨著時間而有所改變。特別是到晚近時期，斯多噶學派相當強調倫理和宗教觀念，但是最基本的教義仍舊是：人不可能改變外在環境，祇能命定地過著單調重複的生活。祇有內修才有自由：即培養內在的美德與和諧。美德是唯一的善，而世俗事務如健康或物質生活一點也不重要。

斯多噶學派看起來似乎是一種苦修哲學。一個以一切物質生活均無意義為主要教義的哲學流派，卻能盛行一時；從今日來看，實在是不可思議。然而，斯多噶學派卻對當時社會具有莫大的吸引力，因此存在的時間久到令人驚奇。特別是各階級的羅馬人都很能接受，包括著名的哲學家伊比鍾克托斯(Epictetus, 西元 60-138)〔註：原書誤植為 Epicetus〕，他是個奴隸，及阿瑞流士(Marcus Aurelius Antoninus 西元 121-180)，他是個帝王。

讓斯多噶哲學在羅馬流行的功臣首推當時的政治家以及律師希賽羅(Cicero, Marcus T. 西元前 106-43)。希賽羅是凱撒大帝（Caesar, Jul-

ius 西元前 100–44）的反對者，然而他並未直接參與刺殺凱撒的陰謀，祇是和那些人站在同一邊。作為安東尼的敵人，希賽羅稍後被奧古斯都大帝處決，在希賽羅的政治生涯中，他寫了許多書，其中包括《神的本質》（*Nature of the Gods*），在書中他詳細說明三種當時流行的哲學，斯多噶哲學正是其一。

嚴格來說，希賽羅並不算是斯多噶學派的一員，但是把他算進納入斯多噶學派，也算離事實不遠。他曾深入研究斯多噶哲學，他自己的著作裡也瀰漫著斯多噶哲學的論調。當他論及三種不同哲學時，對於斯多噶學派，他抱著最大的同情。

西納卡(Seneca, Lucius A. 西元 3–65)是另一位著名的斯多噶哲學家，他既是哲學家、官員，也是個悲劇作家。西納卡是暴君尼祿的老師，在當時的政治活動中具有影響力，最後失去尼祿的歡心，並被迫自殺。西納卡也是個心口不一的哲學家，作為一個斯多噶信徒，他不排斥擁有巨大的財富，並且不斷追求更多，其中有許多是靠橫徵暴斂而來，而這也是不列顛人起而革命，反抗羅馬人的原因之一。

馬克仕・阿瑞流士在西元一六一年成為皇帝。他的著作《冥思錄》（*Meditation*）流傳至今，他在征戰途中寫成這部書，很顯然地，他從來

沒想到要將它公開。阿瑞流士寫作這本書的目的似乎祇是為了個人沈思之用。他似乎樂於過著沈靜的生活，但是卻被國事所束縛。在他掌政時，災禍不斷降臨羅馬，包括瘟疫、地震、飢荒以及連綿不斷的戰爭。阿瑞流士是諸多羅馬皇帝中不斷迫害基督教徒之一，因為基督徒反對接受國教，然而阿瑞流士卻認為為了政治安定，國教必須貫徹。

斯多噶學派的時間觀

斯多噶學派認為時間有限，並且反覆循環，但是和亞里斯多德不同的是，斯多噶學派不害怕接受無限。根據斯多噶學派的宇宙觀，可見的宇宙（包括地球和天堂）存在於範圍無限的虛無之中。而在恆星與行星之外，便是無盡無邊的虛空。

亞里斯多德拒絕接受在宇宙之外有任何東西存在，他拒絕接受外在的虛無。斯多噶學派則不做此想。為了證明虛無的存在，他們引用來自畢達哥拉斯學派的古老論證：假設有一個人站在宇宙的邊緣，並且張開雙臂，會發生什麼事？他將碰觸到宇宙之外的虛無，如果他再站出去一些，並張開雙臂，如此一來，可以不斷地向外多移動一些，因此斯多噶學派說這就證明了虛無的無限。這也證明了斯多噶學派與亞里斯多德學派所相信的無

限並不是同一個東西。對亞里斯多德來說，這祇證明了虛無空間的存在，至多祇是潛在性地存在，而對斯多噶學派來說，無限的存在是實實在在的。

斯多噶學派相信宇宙是個在虛無海洋中漂浮不已的物體，而在宇宙之中，事物反覆發生，唯一自由的便是人類的意志。既然人類不能改變外在世界設定的變化，唯一能做的便是發展內在美德。

線性時間

正如我曾提過的，現代人對於時間的看法和古希臘人大相逕庭。現代人認為時間是一條直線從過去延伸至未來，也有可能貫通無限遠的過去以及無限遠的未來。這種時間觀來自於猶太／基督教的傳承。

在古猶太教中，並沒有宇宙循環的觀念，世界在某個特定的時間點被創造出來，上帝自一片無所定型的虛空中創造出這個世界。在創世紀的六天之後，上帝休息了。宗教上告訴我們，創世紀的事件發生過一次，不會再次重複。在聖經創世紀書中，提到上帝曾許諾諾亞將不會再有大洪水，並創造出彩虹以示承諾。同樣的，出埃及記也祇會出現一次，猶太人不需要一次又一次地逃離埃及。

然而在舊約聖經中，還是隨處可見時間循環論的痕跡。在傳道書中可以讀到這樣的字句：「過去存在的事物，在未來也將存在；過去完成過的，未來也將再次被完成；在太陽下沒有什麼事是未曾有過的。」這樣的字句不算多，也無法證明在古猶太世界中存在著時間循環論。

從本質上來說，基督教義相當強調線性的時間觀。整個基督教環繞在基督的受苦、殉難以及重生。如果這意味著反覆重現的時間觀的話，那麼基督的贖罪便變得毫無意義。因此在新約聖經的聖保羅書中，可以清晰看見保羅不祇一次強調基督僅為人類的原罪受過一次苦。

大約三百五十年之後，聖奧古斯丁（St. Augustine）認為有必要再次強調「基督為我們的原罪死過一次」，他開始寫作著名的《上帝之都》（*City of God*），那時正是西元四一二年。四一〇年時羅馬被西哥德人打敗，很多人將這次災難歸咎於羅馬人放棄多神信仰，改信基督教。奧古斯丁認為必須回應這樣的指控，因此開始寫作。但是這本書直到西元四二七年才完成。如奧古斯丁所寫的，這本書的範圍已經比原先預設的擴大甚多。他攻擊那些繼續主張時間循環論和占星術的「欺人與被欺的賢人」，奧古斯丁說，這些主張時間循環的人不但是群傻子，也是不信神的惡徒。回應聖保羅的觀點，聖奧古斯丁強調，「基督為我們死過一次，當他復活

之後，便不再死去。」

奧古斯丁很清楚大災之年與占星學之間的緊密關係，如果反覆發生的災難與行星的運動相關的話，那麼便可以透過觀測星象而預知未來。「這絕非事實，」奧古斯丁說，「以雙生子為例，即便有一樣的星圖，但命運絕不可能一樣。」他深為占星學主張的決定論所困擾，這可能是導致他攻擊斯多噶學派循環時間觀點的原因，因為決定論和時間循環論基本上是緊密關連的。

雖然循環時間論深為教會所排斥，但是仍舊存在了數個世紀之久。在西元一二七七年，巴黎主教簽署一件譴責兩百一十九項異端的意見書，其中循環時間論被列為第六項。在數年後的文藝復興時期，時間循環論又被舉出來，並且成為熱烈討論的主題之一。這指出即便是在強烈主張線性時間論點的西方基督教世界，時間循環論仍舊有一定的吸引力。

時間與永世

就算接受了西方基督教世界關於世界創生於特定時間的觀念，也並不因此削減了無限線性時間所引發的問題。不但對康德的悖論不能有所解答，反而變得更糟糕。如果世界真的創生於特定時間，這是否意味著上帝

在創生世界之前，已經虛度了無限長的時間？為什麼祂不早點創造世界呢？

那些被指責為「自欺欺人的賢人」舉出這個問題，要求奧古斯丁解答。在奧古斯丁的《懺悔錄》（*Confessions*）一書中對這些問題有所描述，「他們問道，『在世界創生前，上帝忙些什麼呢？』」傳說奧古斯丁的回答是，「上帝忙著為你們這些不信的人創造地獄。」其實奧古斯丁的回應倒沒有這麼輕浮，他很正經地想要找出適當的解答。

奧古斯都向古希臘的哲學求援，結果用處不大，古希臘哲學家慣於認為事物本來就存在，這個概念在柏拉圖的書中就可以發現到，但它並沒有倡言循環時間的概念。柏拉圖在《TIMAEUS》對話錄中提到創造世界萬物的觀念，但是柏拉圖的造物主並不是個無中生有的全能創造者，祂的任務僅僅是將既有的事物賦予形體而已。

因此奧古斯丁必須自己解決這個問題，他的結論是在創世紀之前，時間不存在。時間與世界一同創生，上帝的存在與時間無關，也不受限於時間。質問上帝在創世紀之前的行動是無意義的，因為沒有「之前」。

奧古斯丁的回答正恰似於現代宇宙學家的研究結果。信奉基本教義的基督徒會問：「在大霹靂之前，發生了什麼事？」科學家的回答和奧古斯

丁差不多，「沒有『之前』，因為在大霹靂時，空間與時間一同被創造出來。」

解決了「之前」的問題，並不代表奧古斯丁解決了所有無盡的線性時間相關的問題。奧古斯丁也不這麼認為。有一次，他曾意味深長地問道：「到底時間是什麼？」他馬上自己回答：「如果沒有人問我這個問題，我知道答案；如果有人要求我解釋，那麼我就一無所知了。」又有一次他說：「上帝啊，我向您告解，我對於時間一無所知啊！」

時間的本質是個相當引人入勝的主題，但是我們再漫談下去，將會無邊無際，在下面一章中，我們將要討論線性時間到底是有限或是無限，我們將會知道，即便是科學家也不曉得答案。

依凡・卡拉馬助夫和魔鬼

在杜斯妥也夫斯基（Dostoevsky 1821-1881）的著名小說《卡拉馬助夫兄弟們》（*Brothers Karamazov*）中有這樣的情節，當魔鬼拜訪依凡・卡拉馬助夫時，魔鬼裝扮得像是個荷包滿滿的俄羅斯紳士，表現的正如同依凡一樣是個不可知論者。但伊凡是個親切的傢伙，也是個風趣的談話對象。在魔鬼和伊凡的交談過程中，魔鬼提到宇宙循環的古早理論，他說地

球曾被摧毀，也再次重建，「有十億次之多了，」魔鬼說道，「而這一切都將重複發生，無限多次，而且每次都一模一樣。」

有趣的是，斯多噶學派的時間循環論現在又在線性時間論中出現。作為一個基督徒，杜斯妥也夫斯基接受曾有一次創世紀的觀念，因此，他並未讓魔鬼繼續陳述過去的時間不斷循環而重演的論調，而是讓魔鬼說，「過去發生的重複事件、祇能「有十億次之多」。另一方面，基督教義並不阻止人們想像一個永恆的未來，有無限多次的循環。

這樣的概念在當代文學中也時而可見，在《生命中不可承受之輕》（*Unbearable lightness of being*）這本書中，捷克作家米蘭・昆德拉(Milan Kundera)說，永生反覆是個「瘋狂的神話」，他也說，「如果我們生命中的每一秒都會反覆重演無限多次，那麼我們便被釘牢在永生的囚牢中，正如同基督被釘死在十字架上一樣，這真是個令人驚懼的看法。」

當昆德拉談到永生反覆時，提到十九世紀德國哲學家尼采（Friedrich Nietzsche 1844-1900）所提出的概念。尼采並不祇是重述斯多噶的時間觀，他論述無限循環的時間觀是相當可能的。尼采認為，如果宇宙中的原子數量有限，那麼這些原子所能組合的不同狀態也必然有限。但是，時間是無限的，因此，在無垠的時間軸上，我們存在的世界必定重演過許

多次，今日發生過的事情，在未來將一再發生。

尼采是個古典學者，他對於永生反覆的看法來自於他閱讀古典哲學的經驗，然而他和古典哲學之間還是有所分別：尼采並不以為時間是循環的，他認為時間是線性且無限的，然而他卻獲致與古老哲學家一樣的結論：事件將一再重演，沒有盡頭。

尼采的想法不曾引起科學家注意。其中有些問題，今天看來也有疑義。在本書稍後將可看到，愛因斯坦的廣義相對論暗示，如果宇宙是無限的，時間也將是如此，反過來，如果宇宙範圍是有限的，那麼時間便是有限的，總會有走到盡頭的時候。如果愛因斯坦的理論正確的話（我們很有理由如此相信），那麼尼采關於宇宙有限而時間無限的假設就是錯的了。

第三章

無限的宇宙世界

INFINITE WORLDS

「宇宙是有限或無限」的這個問題，從中古世紀起，已經成為學者經常爭論不休的話題。但他們對世界無限的觀念和現代的宇宙觀很不一樣。中古世紀的哲學家慣於接受亞里斯多德的看法，認為地球被一層又一層會移動的天球(celestial sphere)所包圍，月亮是位於最內層的天球，其後依次是水星、金星、太陽、火星、木星以及土星，而在土星之外的天球則布滿不會移動的星群，這些天球以地球為中心高速轉動，每廿四小時環繞一次。有些時候，為了哲學或是理論上的需要，哲學家會再加上其他天球，整個宇宙可能有八至十一個天球圍著地球。

最根本性的問題在於，最外層的天球之外是不是還有東西？有些哲學家嚴格遵循亞里斯多德的看法，堅決認為在宇宙邊際之外一無所有，不存在事物、空間以及時間。根據亞里斯多德的看法，在最外層天球外緣仍存有空間的想法必然自相矛盾。然而，也有些中世紀哲學家不同意這種看法，而認為在最外層的天球之外，還有無邊無際的虛空。

這種看法和斯多噶學派的宇宙觀雖然有些類似，但是其背後的理由卻是相當不同。有些哲學家認為，如果上帝的存在是無限的，那麼必須存在一個無限的空間，讓上帝可以無所不在。根據從十二世紀的著作《廿四哲者之書》（*Book of the XXIV Philosophers*）引出的著名說法：「神正如一

個無限大的球，球心可以定位在任何地方，也沒有什麼地方不在神的包圍之中。」

這些論述起自於羅馬天主教的神學辯論，其中有大多數的論點祇有學者會感興趣。畢竟，我們現在已經很清楚中古世紀的宇宙觀是錯誤的，環繞地球的並不是一層層天球，而且，如果宇宙是無限的話，它也不會是無盡的虛空，而是由無數的星系與恆星所構成。

天文學的發展

從前，人們認為「地球是宇宙的中心」，這樣的概念維持了好幾個世紀，在亞里斯多德以及聖經的支持下，沒有人挑戰這種看法。即使到了中世紀，天文學知識發展得很慢，而且天文學與宇宙學沒有多少關聯。天文學需要高深的數學技巧與知識。在整個中世紀與文藝復興時代裡，研究天文學的最主要的動力來自於占星測命的需要，在另一方面來說，宇宙學則專屬於神學家與自然哲學家，而他們通常缺乏細讀天文學論文所必須的數學訓練。

就算哲學家熟悉天文學，結果恐怕也差不多，因為當時的天文學理論百花齊放，在十六世紀通行的說法就超過一打，很難有什麼理論能夠統一

所有現象，取得所有人的共識。誠然，所有的理論都有一些共同的假設：地球是宇宙的核心，月亮、星星、太陽環繞著地球運行。但是，更詳細的部分則各說各話。

假定地球固定不動，在天空中，人們可以觀察到兩種不同型態的「視運動」（Apparent Motion）。地球因自轉而造成太陽、星星、月亮的升落，這是第一種視運動。而在地球緩慢環繞太陽的過程，則可以看到另一種視運動。在夏天，當地球在太陽的一側時，地球的天文學家將會看到太陽懸掛在特定恆星背景的天空之中；到了冬天，天文學家看到太陽懸掛的恆星背景，將會是另一幅全然不同的景象。當然，太陽這麼亮，我們無法直接觀測到太陽的背景星座，但我們不難推算出來。這種現象清楚地表現在占星學的符號上：出生日期在三月廿一日到四月十九日之間的人，被稱為太陽位於白羊座的人，而出生於十二月廿二日到一月十九日之間的人，則被歸為摩羯座。

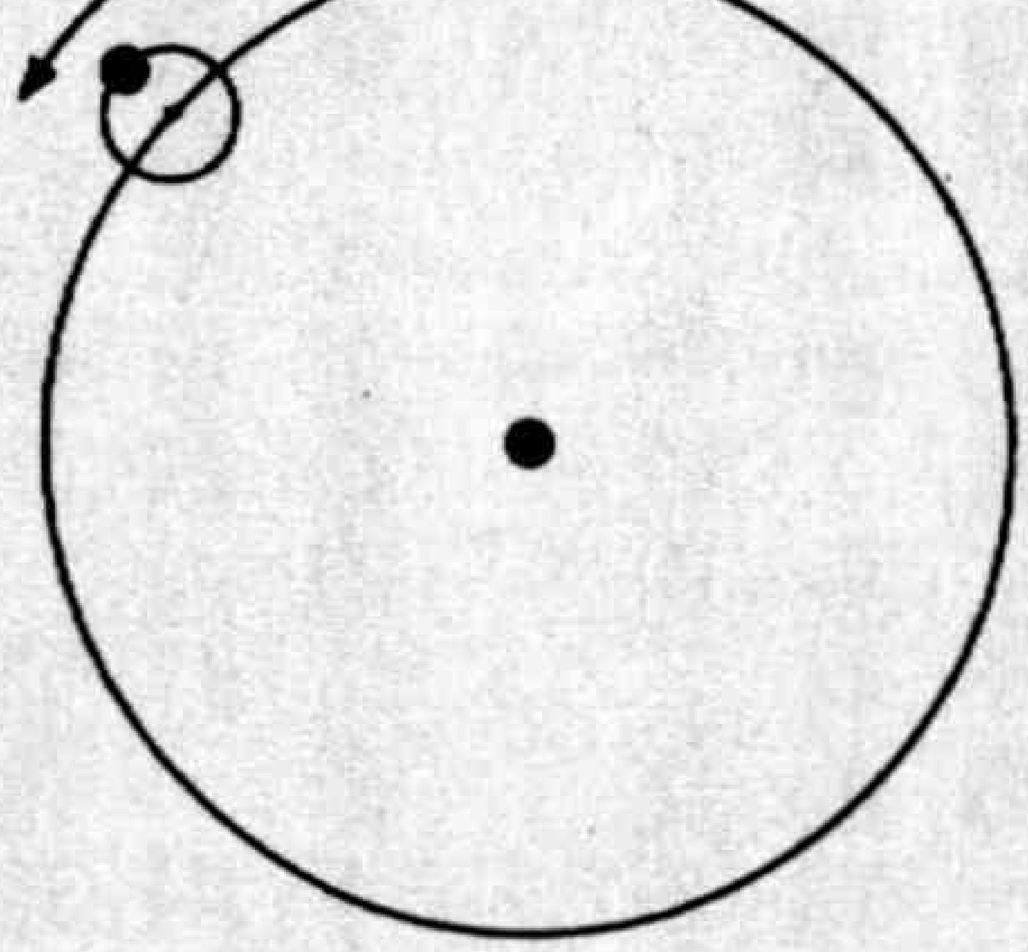
其他行星，我們便可以直接觀察。以火星為例，有些時候，火星會出現在某一群恆星之間，過了一陣子又會出現在另一群恆星的方位，這是因為火星與地球同時環繞太陽運行，因此，兩者之間的相對位置不斷改變，所以，就可以看到火星的位置不斷改變。

假定所有行星都環繞地球運行，觀測到的行星視運動將會變得非常複雜，即便是太陽的視運動都變得難以描述。實際上，太陽在夏天距離地球較近，冬天時，兩者距離較遠，因此，在不同季節就會表現出不同的速度，因而不能假定太陽以正圓形軌道環繞地球等速運行，因為這會與觀測的數據不符。因此，這樣的理論必須修正。行星的視運動就更加複雜了，舉例來說，火星與地球間的相對位置，乃是依火星的軌道運動與地球的軌道運動而定，因此，不僅在軌道上不同位置的火星會以不同的速度穿越星際，有些時候還會逆向運行，也就是說，與原來軌道的運行方向完全相反。

其實不難說明火星何以逆向運行，因為地球的軌道位於火星軌道的內側，速度較快，當地球通過火星時，火星便落在地球之後，正如同兩名跑者環繞操場跑道時，內側跑者超越另一名跑者時，會觀察到外側跑者後退一樣。在這樣的情形下，火星所處的背景星空上的恆星看起來會迅速地移動。

中世紀後期及文藝復興時代的天文學家運用大量的數學技巧來解釋行星的視運動，所有的理論都用上「周轉圓」（epicycle）。然而，單單使用周轉圓還無法解釋行星的視運動，有些時候可能得在周轉圓上再疊上另

一個周轉圓，才能解釋行星運動。有時候，天文學家必須假設行星運行的軌道並不是以地球為中心，而是距離地球不遠之外的一點。若非如此，他們就必須假設行星在自己軌道上不同點時會有不同的速度，因而不同學派的天文學家在如何描述行星運動上，一直無法取得共識，他們各自運用自己的方式加以描述。當一位天文學家不斷添加周轉圓來描述行星軌道時，另一個天文學家可能用了完全不一樣的數學技巧。有趣的是，天文學家似乎不太關心「天球」的概念，這是當時天文學家與研究宇宙的哲學家之間互不相干的另一證據。



周轉圓是哥白尼之前的天文學家使用的簡單的圖示工具之一。
中心的黑點是代表地球。其中較大的圓圈表示行星繞地球運轉主要遵循的軌道。但行星並不是真的就位在這個軌道上，而是在周轉圓上。
行星沿著周轉圓移動，而周轉圓的中心則沿著主要軌道移動。如果兩個運動的方向是相反的〈一個順時鐘，一個逆時鐘〉，那麼從地球看行星，有時似乎會出現逆向的運動。哥白尼之前的天文學家，常更進一步放更多的周轉圓在周轉圓上。

哥白尼革命

十六世紀末時，用以描述天文現象的數學系統已經變得十分複雜，然而卻沒有一個可以充分解釋天體運行的規律，總是會有某些預測和現實不符。因此，當波蘭天文學家哥白尼（Nicholas Copernicus, 1473-1543）被教會邀請修正十六世紀初制訂的曆法時，他建議暫停修訂現行曆法，他認為現有的天文知識還相當有限，不足以將曆法修訂到相當精準的地步。這當然是相當引起爭議的說法，因為要訂出一套精準的曆法，並不需要瞭解所有的行星的視運動，而僅僅需要知道太陽與月亮的視運動。實質上，哥白尼要說的是日月的視運動都還未準確算出來。

直到哥白尼臨終前不久，才出版畢生研究所得《天體運行論》（*De Revolutionibus Orbium Coelestium*）。在書中，他詳細說明太陽才是太陽系的中心，而非地球。這本書出版於一五四三年，正是他死去的那一年，事實上，在他死前應該看過這本書的初版。

哥白尼的遭遇和九十年後的伽利略有很大的不同，伽利略在一六三三年被天主教宗教法庭判定瀆神罪，在酷刑的威脅下，伽利略被迫放棄他主張的太陽中心論（即日心論）。熟悉伽利略事蹟的讀者，可能會認為《天

體運行論》的出版勢必會引起強烈的反對聲浪，然而事實並非如此，理由有二：哥白尼的理論太過新穎，以至於神學家還來不及發現日心論與神學之間的矛盾關係，其次，哥白尼的著作太過於專業，除了天文學家，幾乎沒有人能看得懂，哥白尼的發現很快就在天文學界傳開了，但是在其他領域，則很少有人知道這件事。

天文學家很快地瞭解到哥白尼理論的重要性，但很少人接受地球繞日的觀念。然而，他們認識到哥白尼所提出的理論可以用來計算行星位置，因而願意把「地球繞日」當作一個有用的數學工具。

實際上，哥白尼的計算方式並沒有比過去的理論模型來得更簡單，哥白尼假設行星以圓形軌道運行，看似再自然不過了，但事實並非如此。行星軌道還要更扁平些，也就是幾何學上的橢圓形，而在軌道上的速度和與太陽間的距離有密切關聯。為了說明太陽在夏天運動得比冬天慢這個事實，哥白尼被迫假設地球其實是繞著太陽附近的點運轉，而非太陽本身。此外，他的理論雖然解決了過去其他理論中難以說明的逆向運動，哥白尼還是需要利用了周轉圓及其他數學技巧，才能使他的理論與事實相符。

哥白尼的日心說之所以不是那麼容易被天文學家接受，原因是天文學家並未觀察到背景恆星的「視位置」並未因季節不同而變化。星空看起來

總是一模一樣，這也是人們傾向於相信地球固定於一點不會移動的原因。

現代科技觀測結果確定地球距離太陽九千三百萬英里，而地球由軌道的一邊運行到另一邊，位移的距離便是上述的兩倍；地球軌道幾近於正圓，直徑則接近於兩倍半徑，因此夏天的星空與冬天的星空應當會有些不一樣，就如同當你移動位置，遠方兩棵樹的相互位置看起來便會改變一樣，但是由於相對改變的角度太小，因此改變的幅度並不是很明顯。直到天文望遠鏡發明後，在一八三八年，才真正觀察到其中的差異（這種差異稱為恆星視差（stellar parallax））。十六世紀的天文學家光憑肉眼觀察是不可能發現這件事情。

多重世界

哥白尼瞭解恆星視差必然存在，但是卻苦於無法藉由觀察確認，他的解釋是恆星太遠，恆星視差效應太小，以至於可以忽視。這是個全新的看法，因為過去總是假設恆星與地球間的距離並不遠，當時，土星被認為是最遠的行星。九世紀的阿拉伯天文學家 Fagani 認為恆星與地球的距離大約是七千五百萬英里，對當時的人來說，這已經是大得驚人的數字，沒有人可以想像，最近的恆星與地球間的距離超過這個數字的三十萬倍。

在哥白尼的時代，沒有什麼方法可以確定恆星有多遠，或是這些恆星是不是位在同一個天球之上，也無法確定這些恆星與太陽間的距離是不是時時改變。倒是有一件事可以確定，如果，哥白尼的理論是正確的話，那麼，恆星絕不僅僅是天空中會放出光芒的小石頭而已，如果恆星的距離是那樣遙遠，星星必然是巨大而明亮的物體，也許正和太陽一樣明亮。

第一個深究這個想法的人，應當是英國人狄基士（Thomas Digges），他在一五七六年出版了關於哥白尼學說的科普書。由於狄基士清楚瞭解恆星並非位在特定的天球上，這意味著恆星與地球間的距離並非固定，因此，他把恆星視為宇宙中其他的太陽，而太陽與地球恰位於宇宙的中心，恆星在無限的宇宙中，圍著太陽系，散布在四面八方。

狄基士的想法說來有些自相矛盾，祇有在有限的空間中才會有「中心」的存在，而在「無限」的空間裡，每一點都可以是中心點。這點小小的瑕疵無傷大雅，重點在於他瞭解，如果哥白尼理論是正確的，那麼宇宙的尺度將是無限大，至少是大得不得了。

但真正提倡「宇宙無限大」觀點，並不是狄基士，而是義大利哲學家布努諾（Giordano Bruno, 1548-1600）。在布努諾的哲學中，「無限大

的世界」是最重要的主題意識。

出生於一五四八年，布努諾很快地成為最負盛名的學者。他不僅思想新穎，而且無懼於把這些非傳統、甚至可能被指為異端的哲學想法公然提出。正因為這樣，他付出了相當昂貴的代價：布努諾在一五九一年以傳播異端罪名被捕，經過兩次審判，在一六〇〇年被處以火刑燒死。

布努諾生性叛逆而好與人爭議。他在一五六五年加入多明尼克修會（Dominican order），這顯然是不智之舉，因為他的叛逆不馴觸犯了教會的權威，終於在一五七六年第一次以瀆神的罪名，被宗教教庭判處有罪。他逃離了該教區四處遊歷，成為遊學四方的學者。那一年，他在義大利城市間，短暫生活了一段時間，包括熱內亞（Genoa）、杜林（Turin）、薩佛納（Savona）、諾里（Noli）等地方。之後到達威尼斯，巴都（Padua），最後到了米蘭。他在一五七八年離開義大利，前往法國，從一五七九年一直待到一五八三年。一五八一年獲得神學學位，然後前往巴黎，一五八三年到英國牛津講授哲學。

由於亨利八世與羅馬天主教廷決裂，另創英國國教，布努諾在英國居留期間並未受到調查，但布努諾好爭辯的個性終於再度將自己捲入麻煩之中。當時的牛津校園是服膺亞里斯多德思想的重鎮，學生如果不接

受亞氏思想將會被處罰，情況嚴重者甚至可能被解除。布努諾大肆攻擊持亞氏想法的牛津學者，很快地使他被迫黯然離開牛津。

他又到過倫敦、巴黎，然後來到德國，先後在幾個大學中教授過。他在一五九一年來到蘇黎世，一位仰慕布努諾已久的富有貴族邀請他擔任家庭教師，布努諾欣然同意，這是他去國多年之後第一次踏進義大利故土。

這是另一個不幸的決定。布努諾和貴族之間相處並不愉快。很快地，貴族注意到布努諾的異端思想，終於在一五九二年，貴族在神父的建議下，將布努諾送進宗教法庭進行調查。

這次審判結果一直沒有做出決定，因為在那之前，布努諾就已經先被引渡到羅馬去，被關在地牢中六年，才進行另一項審判。西元一六〇〇年的二月十六日，布努諾被處以火刑，他的著作也被公開焚毀，並被列為天主教徒的禁書。

根據十六世紀古書的記載，布努諾的著作被控以六項瀆神的事實，到底是哪些內容瀆神，到現在已經不復查考。有人猜想，他很可能在著作中提及無限的宇宙中，存在著無限多的世界，而其中一部分的世界上住有其他人類。

布努諾相信，宇宙在時間和空間上是向著古往今來、四面八方無窮延

伸。他相信宇宙不單沒有邊界，而且還是永世存在的，至於太陽，祇不過是無數個恆星中的一個。其餘部分是看不見的，人們不得不想像宇宙是無限的，也祇有無限的宇宙才能由無限的上帝創造出來。

根據布努諾的說法，上帝唯一的選擇便是創造一個無限的宇宙，任何其他的選擇祇能表現祂無限神能的一部分。因此，布努諾反對斯多噶學派認為有限的世界之外，盡是一片虛空的說法。在布努諾的世界中，虛空是不存在的；宇宙中不同的世界之間，充滿了一種稱為「以太」（ether）的物質和無所不在的上帝共存。在布努諾的作品《無限的宇宙》（*De l'infinito universo*）中這樣寫著：

「因此，上帝的優越與天國的偉大如此顯明，祂的榮耀不祇行在我們的太陽之上，而是行在無以數計的太陽；不祇行在我們的地球上；不祇行在我們的世界上，更行在許許多多的、無限的世界上。」

很明顯的，這樣的觀點必然對拘泥教規的教會權威造成困擾。根據教義，世界在特定的時間點被創造出來，不像布努諾所說的，有所謂的永世。更有甚者，還有其他的世界更是問題。人類祇有一次墮落與一次救

贖，人類從亞當與夏娃開始，繼承了生而為人的原罪，如果還有其他世界和其他子民，那麼要如何把他們納入我們一般所熟知的宇宙之中呢？於是人們不得不假設其他世界的子民是亞當與夏娃繁衍四散的子孫，而耶穌被釘於十字架上，也是為所有世界上的一切贖罪；或者是，這些世界上的人類根本不需背負原罪，也不需要救贖。不過，這兩種說法都犯了瀆神的大罪。

誠然，布努諾認為世界有無限多個的看法並不是他唯一瀆神的看法，他還相信輪迴轉生，地球及整個宇宙也有靈魂。不過到了現在，我們每每提到布努諾的時候，都是引述他對於宇宙中擁有無限多個世界的看法。也許正如布努諾所堅持的，無限宇宙的概念對於人類來說有種獨特的吸引力。現代科學到目前為止，還無法確認宇宙是否真是無限，然而，布努諾對於「無限」的觀念，對於現代人來說，還是最具吸引力與想像空間。

這也緊緊抓住了他下個世紀思想家的想像力，但恩（John Donne, 1572-1631）的作品、伯頓(Robert Burton, 1577-1640)的《解剖憂鬱》（*Anatomy of Melancholy*）以及密爾頓(John Milton, 1608-1674)的《失樂

園》（*Paradise Lost*）以及西薏諾(Cyrano de Bergerac)的科幻小說中，有太多地方提及多重世界的觀念。

十七世紀末，多重世界論點已經被大眾所接受，英國詩人波普(Alexander Pope)就曾在他的《人論》（*Essay on Man*）中，寫下這樣的句子：

「在這無窮數的世界中
祇有上帝才知道個數的世界，
而我們祇能以自己的方法追隨祂。
祇有上帝才能穿越這廣渺的空間，
看著一個又一個的世界組成宇宙，
觀察這宇宙的體系如何運作，
以及其他的行星如何環繞著自己的太陽運行，
看著星星上各自不同的人群，
或許能告訴我們上帝何以把我們生成這般模樣。」

人們倒不是僅僅憑著布努諾的的著作，便相信宇宙是由無窮多個世界所組成，伽利略從望遠鏡中看到的星空景象也是推波助瀾的因素之一。然

而，如果教會企圖藉由燒死布努諾來遏止這些所謂的瀆神思想，其結果剛好相反，教會壓抑得越厲害，這些思想散布得越快。

科學革命

雖然布努諾堅信哥白尼的日心說，然而，他卻不是一個科學家，對於天文學的貢獻也極其有限。如果將他和哥白尼、伽利略、克卜勒、第谷及牛頓等人列為科學革命的推動者之一，說來不免有些牽強。就拿第谷（Tycho Brahe, 1546–1601）來說，他仔細而持續多年地觀察星辰運行得出的結論，對改進哥白尼理論的貢獻就比布努諾要多得多。

在哥白尼時代，天文學家對於星空的觀察結果並不足以得出一個稱得上是精確的天文學理論，這些觀察結果中有太多太多的錯誤，主要原因來自於當時觀測工具不發達、抄寫過程筆誤等因素，以至於最後結果錯誤百出。此時天文學家最迫切需要的工具就是一組全新、可以信賴的天文學數據，第谷做到了這一點。

第谷出身丹麥貴族，過著奢華的生活，丹麥國王佛瑞德瑞克二世賞賜給他兩百公頃的土地，並在皇室的資助下建立天文觀測台，其中有最好（也是最昂貴）的觀測器材，也有時鐘、地球儀、日晷儀等儀器。第谷也

經營獵物醃製、私人魚池、紙廠、印刷廠，他甚至還擁有私人監獄，正如同當時其他貴族，他們認為生活就是享受。

第谷是當時最優秀的天文學家，他將肉眼觀測天文學推到極致，對每個重要的天文觀測結果做修正，並且精確估量「年」的時間長度，最大誤差不超過一秒。第谷的研究成果也促成了新曆在西元一五八二年的修正。他仔細觀察並記錄行星運動，其精確的程度當時無人能出其右。

占用第谷的數據

第谷並不是哥白尼的信徒，他一直在尋找恆星光視差的徵象，當他始終找不到之後，他便自行創造出一個以地球為中心的太陽系模型，在第谷的模型中，太陽與月亮繞著地球轉，而其他的五個行星則環繞太陽運行。從數學上來驗證，第谷的模型與哥白尼的理論完全一致，這兩個模型都設定行星繞太陽運行，如果計算地球及太陽軌道，無論是將地球或是太陽設定為靜止不動的中心，結果都將一樣，因為在這兩個模型中，地球與太陽之間的相對運動狀態也完全一致。

第谷去世之後，做為第谷最後一年半裡擔任助理的克卜勒(Johannes Kepler, 1571-1630)得到了所有第一手的觀測資料，因而使得克卜勒能夠

深入探討行星軌道。當第谷還在世時，對於自己的觀測數據相當謹慎，給克卜勒的研究資料也很有限。當第谷去世之後，克卜勒乾脆把資料都據為己有，幾年後，克卜勒曾寫信給友人說，「取用我自己所保管的資料，或許乾脆就整個搶過來好了。」

經過長達數年的仔細計算與研究，克卜勒歸結出重要的行星運動定律，牛頓正是在這個定律的基礎上進一步發展出他的萬有引力定律。在克卜勒的第一定律中，他認為行星的運動軌道應為橢圓形，而不是圓形路徑，祇有這樣才能解釋第谷所觀察到的數據。在克卜勒第二定律中，他認為，行星在軌道上運行的速度時時改變。而在一六一九年才提出的克卜勒第三定律中，則指出行星與太陽間的距離與行星運行一周所需的時間有關，此時，已經是第谷死後十八年了。

和第谷不同的是，克卜勒相當支持並且致力於推廣日心說。克卜勒計算出來的數據充分證明了哥白尼的假設理論，從此之後，哥白尼日心說的地位再也無可動搖。當時沒有任何實驗可以證明地球會移動，然而克卜勒提出了一個相當可信的天文系統模型和實際觀察的結果幾無差距，同時也不需要用到其他天文模型中層層疊起的周轉圓與繁複的數學技巧，又可以將過去種種模型的疏漏一次修正。

克卜勒和他的前輩第谷一樣，是很受歡迎的占星家，他所繪製的占星圖也是當時最為準確的一份。克卜勒在一六〇一年成為神聖羅馬帝國皇帝魯道夫二世的宮廷數學家，他的工作之一便是為皇帝及其他顯貴繪製占星圖。如此一來，占星術之類的偽科學，由於財務充裕，反而促進了科學革命的進展。

在克卜勒時代，教會對日心說的反彈越來越大，羅馬天主教教廷直到一八二二年才同意日心說的書籍可以印行出版。新教徒對於哥白尼學說的反對更甚於天主教徒，然而由於新教徒並未掌握像天主教宗教法庭一般的權威機構，無法像某些天主教國家一樣，可以實施嚴格的思想控制。就這樣，克卜勒在新教徒的領土上繼續研究工作，並未受到太多干擾。他唯一的困擾便是要保護母親不被指控為女巫。

當克卜勒的母親在一六一五年被指控為女巫時，他直接對抗這些控訴，並且要求檢察官要將所有與他母親有關的文件都要送一份副本給他過目，然而克卜勒的母親卻愚蠢地試圖賄賂官員取消控訴，這並無濟於事。一六一六年十二月，克卜勒覺得走為上策，於是便和幾位親戚將母親帶往奧地利，但由於水土不服，克卜勒的母親在奧地利住了八個月之後，又自行返國。

一開始時，似乎一切平靜，法庭蒐羅了許多證據，但是並未對克卜勒的母親採取行動，直到一六二〇年八月，她才被逮捕入獄。她在獄中待了一年兩個月後，被釋放出獄，這可能是因為克卜勒老太太面臨酷刑的威脅也不願認罪的結果。當時有許多嫌犯一看到刑具，就嚇得當場招認一切罪狀，當時所謂的酷刑實在很恐怖。以當時眼光看來，以器具夾碎拇指骨的逼供方式，和當時其他的作法比起來，根本不能算是酷刑。克卜勒的母親並未被嚇倒，她告訴法庭寧可一死，她相信在死後，上帝會為她討回公道，這讓法庭印象深刻，再加上兒子身為皇室占星家的身份，她最後終於擺脫女巫的罪名。

克卜勒可能是第一位以外星人為題材的科幻小說家，寫於在一六〇九年，但直到一六三四年才出版的《*Somnium*》一書中，克卜勒提到月亮之旅，把月亮分為兩個半球，永遠向著地球的這一面文明較為發達，叫做薩佛發（Subvolva），住著薩佛發人；另一半則稱為普利佛發（Privolva）住著文明較落後的普利佛發人。

這部小說並不是一般的文學創作，而是為了說服其他科學家接受哥白尼日心說而創作，為了達到這個目的，克卜勒在書中夾帶了一篇天文學論文。故事是說有個名叫得瑞克特斯的年輕人，有個巫婆媽媽。為了幫助他

兒子，她召來一位智者的靈魂，做了一場天文學的演講，同時也討論到太空旅行、月球地理和月球人等相關問題。

克卜勒除了寫科幻小說、為他母親辯護奔走、占星算命之外，仍舊進行他的科學研究。他根據第谷留下的數據，配合他的橢圓形行星軌道理論，計算出一套行星運行表，並在一六二七年出版，由於這套運行表十分精準，更讓日心說具有可信度，獲得科學界普遍接受。同時，經由伽利略及其他人的努力，社會大眾也漸漸知道日心說。早在一六一一年，但恩便已認可哥白尼的理論「很可能是真的」，而且已經「深入人心」。同年間，在他的詩集《解剖世界》（*An Anatomy of the World*）宣稱「新哲學質疑一切」。當然，他指的是新的宇宙觀，摘除了地球在宇宙中心的地位，並使地球淪為一顆平凡的行星。

伽利略的望遠鏡

一六〇九年，伽利略聽說有位荷蘭人建造了一種儀器，可以將遠方的物體影像放大，在幾個月之中，伽利略便研究出了這架儀器的原理，並且建造了一具自用的望遠鏡。他的第一架望遠鏡可以將物體放大八倍，很快地，二十倍、三十倍放大能力的望遠鏡也陸續有人製作出來。伽利略一製

造出最新的望遠鏡後，便開始用它來研究天象，他似乎是第一個把望遠鏡轉向星星的人。伽利略一開始觀察星空，立刻獲致一系列重大的發現，他發現木星有四個小衛星，觀察到太陽黑子，並發現金星會像月亮一般有盈虧現象。

伽利略衷心支持哥白尼的日心說，也發現許多證據，然而，他們發現許多可資說明的資料，卻無法證實哥白尼的理論為真。伽利略發現木星有衛星環繞，證明在太陽系中有星球不繞著地球轉，然而這卻無法證明地球必然繞著太陽轉；同樣地，發現金星的盈虧固然推翻了哥白尼以前的理論，卻無法否定第谷的地心說。

事實上，伽利略的天文理論比起克卜勒又倒退了幾步，伽利略就是不能接受克卜勒提倡的橢圓軌道學說，他堅持由於圓形是最完美的圖形，因此，行星必然遵循正圓形軌道運行。伽利略自己對這些細節倒不是很關切。在伽利略的著作《關於兩個主要世界體系的對話》（*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*），他談到行星以圓形軌道繞太陽，卻忽略了這樣圓形軌道，太陽不可能在圓心，圓形軌也必須加入周轉圓，才能與觀察數據相符。（校訂者註：這是哥白尼原始的模型。後來克卜勒發現軌道不是圓形，而是橢圓形。太陽位於橢圓的兩個焦點之一，如此就可

免掉複雜的周轉圓，克卜勒這個修訂才讓牛頓發現萬有引力定律。」

不過，伽利略對促使新天文學誕生之貢獻，或許比勒卜勒來得多。克卜勒的著作大多是純學術性的，祇有天文學家才看，而且他的觀念祇在相當小範圍的科學圈內慢慢地傳開來。相對地，關於伽利略學說的消息以及他的天文發現卻很快地傳遍整個歐洲。

這很明顯是伽利略所想要的結果。就像他用義大利文而不是用拉丁文來寫《對話》一書，目的就是想要讓他的書更普及化。

在一六三三年，也就是《對話》出版一年後，伽利略就被傳喚到羅馬交付審判，並被迫放棄日心說的主張。然而，伽利略所造成的影響是很大的。《對話》一書在一八三五年翻成拉丁文，使得在歐洲每個受過教育的人皆能讀它。伽利略的審判和被迫放棄學說主張，反而，造成當時哥白尼學說的盛行。

《對話》一書，在確定哥白尼學說上所做的貢獻並不多。伽利略可以讓「日心說」的概念看起來更合理化，但他並沒有再進一步深化這個理論，他的論證也不算是嚴格的論證。不過，伽利略的書是很有說服力，並深具影響力的。他的論證有效地推翻過去天文學所根據的亞里斯多德宇宙觀。此外，他證明了從物理學的觀點來看，「地動說」顯得更合理。他指

出，「一個從高處掉下的物體往正在動的地球拋下，並不會直直落下」的概念是錯的。

反哥白尼學說者認為，如果地球快速自轉，那麼從高處落下的物體，其落點必然會偏西。伽利略指出掉落的物體會跟著地球一起運動，因此落點不會因地球向東轉動而偏西，它仍會垂直掉到地面，與地球是否自轉無關。他用從移動船隻的船桅拋下的物體為例，來支持他的論證。他說，這樣一個物體會直接掉到甲板上，而不會落到船後。同樣地，他批評那種主張「移動的地球會產生源源不斷的強風」的想法是錯誤的。因為當地球自轉時，空氣會跟著轉。

但在《對話》一書中，也有一些概念是錯的。雖然伽利略知道大氣會被地球帶著走，但他似乎認為海洋的情況並非如此。他試圖論證潮汐是地球自轉的結果。根據伽利略的看法，地球自轉和它繞著太陽公轉，使得潮漲潮落，進而影響海平面的升降。我們現在知道，事實上，潮汐是由月球與太陽的引力影響所致，太陽的影響程度較小。這是克卜勒原先就已猜測到的事。

但伽利略潮汐理論的錯誤，或許是可以被原諒的。因為，在他那個時代，對於引力的瞭解還很少。直到牛頓提出萬有引力理論，人們才能夠提

出關於潮汐確實如何產生的決定性證明。整體而言，我們可以這麼說，儘管《關於兩個主要的世界體系的對話》有一些暇疵，但它是一項偉大的成就，同時也是科學史上最有效的宣傳武器之一。對於日心說的普及化，最有貢獻的人，是伽利略，而不是克卜勒。

宇宙果真無限？

當伽利略把望遠鏡轉向天空之後，他發現了許多過去用肉眼看不到的微弱星光，當望遠鏡放大倍率越來越高，科學家們也發現越來越多過去看不到的恆星，這不禁讓科學家聯想到恆星的數目應該是無止境的。假設星星的亮度都一致，（這和事實有些出入，然而以當時的觀測技術來看，這種假設相當合理。）那麼這些新發現的昏暗恆星一定是位於距離地球更遠的地方，這樣推演下去，將會得到宇宙是無限的結論。

這套推論並非完美無瑕，因為所有的恆星仍然可以可能位於一個巨大而有限的球體上。然而，到了十七世紀末，無限宇宙的概念已經很普遍了，即便是畏懼處理「無限」概念的伽利略也接受了這個想法。

在《對話錄》裡，伽利略說宇宙是否有限的爭議還沒達成結論，也沒找到足夠的證據來支持各自的想法。他接著說明，為了辯論的需要，他願

接受「有限宇宙」的說法。這件事情很快就落幕了。然而，伽利略在一六三九年寫信給在巴都大學任教的友人林賽提（Fortunio Liceti），又有不同的說法。在信中，伽利略表示他並不相信宇宙有限或無限的爭議已經塵埃落定了，他自己是比較傾向於接受「無限宇宙」的概念。

伽利略的推論慢慢浮現出來。首先，他說不管有限有邊或無限無邊的宇宙，他都無法理解。接著他論述說，祇有「無限」才不可能為人類的有限理智所理解。既然人類對宇宙無法理解，因此宇宙必然是無限無邊的。在這裡，我們看到伽利略的論點和布努諾截然不同，雖然兩者都主張宇宙是無限的。對布努諾來說，「無限」的觀念能否為有限的人類理智所理解，這樣的問題他根本不納入考慮。

萬有引力定律

一六八七年牛頓以拉丁文出版了他的經典名著《自然哲學的數學原理》（Philosophiae naturalis principia mathematica）。書中，牛頓證明了如果假設天體間以與距離平方反比的力彼此吸引，則可解釋天體的運動。舉例來說，如果，距離增加二單位，則兩個天體之間的力大約會變成原來的四分之一。因為四是二的平方（2×2＝4）同樣的，如果距離增

加三單位，則萬有引力會變成原來的九分之一。（因為3×3＝9）。

然而，牛頓主要的貢獻，並不在於發現萬有引力的平方反比定律。因為他的同代人，英國科學家虎克（Robert Hook 1635-1703）和建築師列恩（Chvistopher Wren, 1632-1723）就已經猜測到萬有引力定律的形式。牛頓被公認為是發現萬有引力定律的人，是因為他是唯一一個能用數學，證明萬有引力定律可以推導出刻卜勒的行星橢圓軌道的規律。

牛頓並沒有急著想發表他的研究結論。根據一個常被提起的故事，在一六八四年，有一天，天文學家哈雷（Edmond Halley, 1656-1742）前來拜訪牛頓。哈雷問牛頓如果引力是隨著平方反比定律而變化，那麼星球的軌道應該是何種樣子。牛頓馬上回答說，軌道一定是橢圓形。哈雷很吃驚地問牛頓，他是如何知道的，牛頓回答道：「我算出來的。」不過，當哈雷向他要計算式子時，牛頓卻找不到。

正如牛頓的傳記作家威斯特佛（Richard Westfall）所說的，或許牛頓是假裝找不到他的計算式子。他很可能想要在其他人看到之前，再檢查一遍，他在幾年前所做的計算。但不管如何，哈雷很快便收到牛頓一篇九頁的論文，題目是「論軌道上的天體運動」（the Motion of Bodies in Orbit），哈雷一看就知道它的重要性。

牛頓一完成《論軌道上的天體運動》，便開始著手寫一本處理有關運動的問題和太陽系動力的書，他不到八個月，就完成其不朽的著作《原理》（*Principia*），並在一六八六年送到皇家學會（Royal Society）。而哈雷再度扮演重要角色，正是他向皇家學會提案，主張學會應該出版這本書。但這項舉動差點讓哈雷丟官。因為那時候，哈雷祇是學會的書記，以他的職位身份是沒有資格提案的。最後，一切事情都有令人滿意的結果，《原理》在一六八七年出版，而哈雷也保住他的工作。

牛頓主張宇宙無限

在《原理》一書中，牛頓關切的重點在於提出精確的數學證明，而不是猜測宇宙是有限還是無限。然而，牛頓自己卻相信宇宙是無限的。在《光學》(*Opticks*)中，牛頓描述宇宙的方式和布努諾如出一轍。和布努諾一樣，牛頓相信在無限的宇宙中到處充斥全能的上帝。甚至牛頓曾經描述無限的宇宙是「上帝的中樞神經」（God's sensorium），萊布尼茲(Gottfried Wilhelm von Leibniz德國哲學家)為了這件事情取笑過牛頓。牛頓可能因此而退縮不前，當時，這兩個人為了爭取誰才是微積分的發明者相持不下。

在《光學》中，牛頓並未倡議無限宇宙。要知道牛頓的看法，得回頭看看牛頓寫給友人的信件，而不是公開印行的著作。牛頓寫給班德利牧師（Richard Bentley）的信中說道，如果宇宙是有限的，那麼萬有引力會導致所有的物質向宇宙的中心集中。反之，當宇宙是無限的，個別的物體承受來自於四面八方的引力，如果宇宙的物質又是均勻分布的話，則這些力量互相抵銷的結果，那麼物體就不會被吸到某個中心點去。

試想這樣的說法：如果宇宙是有限的，位於宇宙邊緣的星體會受到來自內緣的引力，但卻不會受到「外面」引力的影響，於是便會吸向中心。這個說法看似有理，然而卻是個錯誤的推論。這證明了即便是偉大的頭腦在遭遇「無限」的時候，仍然無法避免犯錯。如果有無限多物體均勻分布在宇宙中，祇要某個地方多了一點點質量，就可以讓所有的東西都撞在一起，與宇宙有無邊界無關。

歐柏悖論

現代天文學家的觀測結果已經發現宇宙中星體的確結集成一群一群地。恆星集成星系(galaxy)，許多星系再結集成星系群。這些巨大的星系群已經穩定存在數十億年。這些星系沒有塌縮的原因是因為這些星系的自

轉，星系裡的恆星繞著星系中心旋轉的模式，正如同太陽系中行星繞著太陽運行一般。

直到十七世紀末時，還是找不到什麼堅強的理論，可以為無限宇宙的概念辯護，有些人甚至認為永遠找不到足夠有力的說法。相信宇宙無限是一回事，實地觀察又是另外一回事，終究沒有人可以看到無窮遠的地方或是數完無數個星星。

也許，宇宙並非無限，那可有人真正找到宇宙有限的證據？哈雷覺得他找到了。在一七二〇年，哈雷提出一套理論。他說，如果宇宙中有無限多個恆星，那麼，我們的天空將會無時不刻一片明亮耀眼，像太陽的表面一樣。如果宇宙有無限多個的恆星，那麼無論我們往任何一個方向看去，至少會看到一個恆星，也許這無限多個恆星總和起來的亮度沒有辦法像太陽那樣明亮，但至少也會讓天空看來一片光明。

這個論證並不是哈雷首創的，在他之前，狄基士以及瑞士天文學家奇勞士(Jean-Philippe de Cheseaux)都曾提出類似的看法，很奇怪地，這個悖論卻不以這些人來命名，而是被命名為歐柏悖論(Olbers' Paradox)，它的名字來自一八二六年重新提出此悖論的德國天文學家歐柏(Heinrich Olbers)。

縱使看來簡單，但歐柏悖論並不容易被駁倒。現代科學家相信，宇宙起源於一百五十億年前發生的大霹靂，如果這是真的，那麼，即使宇宙是無限大，但離地球遠過一百五十億光年的恆星我們也看不到，因為這些星光還未到達地球，於是我們至多祇能看到距離我們少於一百五十億光年的星球。第一個解決歐柏矛盾的人是柏依（Edgar Allan Poe）。柏依在一八四八年指出，當我們望著星空的時候，並回溯過去，我們看到的是恆星創生之前的黑暗處。

但是，如果宇宙的確起源於大霹靂，新的問題又出現了。無論我們向任何方向看去，都應該能夠看到大霹靂火球所發出的光充滿整個宇宙，但是事實並非如此。關於這個問題，稍後在我們討論膨脹的宇宙時，將繼續再討論。

第四章
無限小

THE INFINITELY SMALL

「宇宙（有人管宇宙叫做大圖書館）由無數的六角型書櫃組成……，」波赫士的短篇故事《巴倍爾圖書館》（*Library of Babel*）就是這樣開頭的。在圖書館中的每一座六角型書櫃中都由十二層書架組成，每一層都放著三十五本有著四百一十頁的書。這座圖書館藏著任何有四百一十頁可能的書，已經亙古存在不計其時，而且將繼續存在直到無窮遠的未來。任何可能的字母的排列組合所形成的「文句」，都已經刊在某一本書中。因此，多數的文稿都是由不可解的文字所構成，比如說，其中有一本從頭到尾都由ＭＣＶ三個字母組成；也有一本的內容是由所有字母散亂組合而成，完全沒有次序可言，也讀不出任何意義，除了在倒數第二頁有著「哦，如金字塔群的時間」等字樣。

也有少部分文稿並不是絲毫無法理解，波赫士形容一本早五百年前出土的書籍，其中便有兩頁可以解讀。一開始時，考古學家們以為這是以葡萄牙文寫就，也有人以為這是用猶太語系中的意第緒語（Yiddish）完成的，直到最後，考古學家們終於達成結論，確定這是由撒摩耶的立陶宛人帶著圭拉民腔(Guarani)的方言，還看得出來受到古典阿拉伯語的影響。

在故事的第二段，作者用著詼諧的語氣模仿中古世紀關於上帝的格言，他這樣說著，「這個大圖書館就是個無限大的天球，每一座六角型書

櫃都是祂的球心，而其圓周卻永遠達不到。」在進入結論時，他又開始說這宇宙的圖書館是無限的，但是其中收藏不同內容書本的數目，雖然是極大，卻不是無限大。因為「宇宙（圖書館）雖然無限，卻是循環的。」無論從那個方向出發，最後總會遇到同樣的書重複出現。

波赫士的想法令人聯想到斯多噶學派的循環宇宙觀，唯一的差異在於波赫士認為空間在循環，而非時間。除此之外，波赫士似乎也預見現代的宇宙學家將指出宇宙有可能具有類似的結構，雖然這可能性不大。但是我也發現在波赫士的故事結局附近有一個小小的註腳相當有趣，他說，「這整個圖書館應該可以由一本書取代，祇要這本書可以容納無限多張無限薄的書頁。」

十七世紀初期義大利數學家卡瓦利力（Bonaventura Cavalieri）認為一個立方體是由無限多的平面疊加一起形成的。而波赫士的想法正是如此。根據卡瓦利力的說法，我們可以設想一個圓柱體由無限多片圓形薄片組成，同理可證，正方形可以由無限多片方形薄片組成，這倒不是什麼新鮮的想法，古希臘數學家早已經說過，一條直線由無限多點所組成。卡瓦利力獨創的地方在於他運用這種想法進行數學運算。

這種方法雖然富創造性，但是也引出不少問題，例如，如何表達無限

小的數量？有任何方法可以把這無限多個微小數字加總起來得出一個有限的數？這樣的數到底是什麼？無限小的數是否就等於零？有什麼數比零大，卻又比已知的任何數小？如果用任何數字除以無限大，得到的數字會不會是零？還是一個無限小的數？

落體

根據在伽利略死後許久，首度由伽利略的弟子維維安尼（Vincenzo Viviani）所講的故事版本，伽利略曾經示範過把兩個不等重的物體從比薩斜塔拋下。他假想如此操作可以證明兩個不等重的物體會同時落地。現在的科學家相信，伽利略不太可能做過這樣的示範。如果伽利略真做過，他將會發現兩者不會真的同時落地，重者將會先落地，雖然，其差別很小。關鍵在於空氣阻力，重物較不受空氣阻力牽制，而能較早落地，唯有在真空中，不等重的物體才能同時落地。

伽利略對於落體的現象相當感興趣，然而他並非直接觀察物體垂直墜落，它太快了，肉眼難以觀察。單憑眼睛，實驗者根本看不出來物體釋放時，是否已經有了初速度，或是從靜止開始，然後逐漸加速。如果，物體在墜落的過程中逐漸加速，我們如何測出物體掉落過程中，某

一特定時刻的速度?

在伽利略進行落體的相關實驗之前，他需要找出某些方法來「減弱」重力的影響。他用一塊與平面成傾斜角度的斜面來研究這個問題。如果在斜面頂點釋放球體，在「掉落」過程中，物體仍舊受重力影響，但是行進速度將會減慢。舉個例子，如果在六呎高釋放一顆木球，木球將在略多於十分之六秒的時間中掉落地面，但是同樣的實驗放在一塊與水平成四度夾角的斜面上，整個過程將會延長到將近九秒。

伽利略是第一個針對現實世界中物體真實行為加以研究的科學家。在伽利略的時代中，這是一件非比尋常的事情，因為亞里斯多德學派對世界萬物的想法決定了一切。如果有位科學家想要知道落體如何運動，必須先去翻閱古籍看看亞里斯多德如何說，或是運用亞里斯多德的原理來推論，因此，如果兩物同時釋放，無須質疑，重者一定先著地，因為亞里斯多德這樣說過。

縱然伽利略是個偉大的科學家，但是當他進行實驗時，他並不像現代物理學家那樣要求絕對的精準，事實上，有時他也會便宜行事。伽利略的實驗數據偶爾會好得過分，超出當時所有實驗器材能達到的精準程度。還有些時候，學者從伽利略討論某些實驗的方式看出他並未實際從事這些實

驗，很顯然地，伽利略相信祇要他能搞清楚實驗的來龍去脈與結果，就算未實際操作也無傷大雅。

不管如何，伽利略得到正確的答案。在與落體問題搏鬥多年之後，伽利略終於成功地用數學方程式描述自由落體行為。他發現墜落過程中，任意時刻的速度與經過時間成正比關係，經過距離則與時間平方成正比。例如，物體自由墜落後第三秒時的速度是第一秒時速度的三倍，而在釋放後三秒內所經過的距離則是第一秒內運動距離的九倍（$3^2=9$）。

瞬間速度

對於多數現代讀者而言，找出自由落體運動的規律可能並不是件太難的事，當時卻是件耗盡心力的大工程。在伽利略生活的年代中，普遍認定速度與運動距離成正比，伽利略自己也曾犯了這個錯誤達數年之久，他曾認為物體釋放經過五呎後的速度應為釋放後第一呎速度的五倍。當伽利略發現自己犯錯時，他必須找出描述加速度運動的正確定律。物體釋放後將進行加速運動，因為速率並非維持一定，落體每多經過一瞬間就會比上一瞬間的速度快一些。比起等速度運動來說，這種不斷加速的運動形式更難加以分析。

通常當一個科學謎題解開後，便將浮現更深入、更難解的問題。當伽利略成功地以數學形式描述自由落體運動後，他便發現了另一個難題。測量平均速度相當容易，祇需要將經過時間與行經距離相除，即可得到平均速度，例如在一秒內行經六呎，平均速度便是每秒六呎。然而，自由落體在每一瞬間都會有相對應的特定速度，在六分一秒時，物體以特定速度行進，再過四分之一秒，又會是另外一個速度。伽利略為了要定義出「瞬間速度」（instantaneous velocity）真是絞盡腦汁。

為什麼這個問題對伽利略來說這麼難？試想像這樣的實驗，假設我們從比薩斜塔上丟下一顆棒球，我們想知道在釋放後一秒鐘時的精確速度。所以，我們在整個過程中每十分之一秒拍照一次，這樣一來，我們便可以從照片中知道棒球在特定時間裡行經過的距離，兩者相除便是速度。

其實，我們祇能得知十分之一秒內的平均速度，我們重新實驗一次，這次，兩次拍照時間差為千分之一秒，然而，我們還是祇能得到平均速度。就算我們想像可以取得十億分之一秒的拍攝時間差，但是即便再小，祇要有時間差，無論多小，我們所得到的都還是平均速度！很明顯的，實驗結果很明確，但是我們仍然無法得知在某特定瞬間的球速。

這個問題困擾著伽利略，自由落體在墜落過程的每一點上都會有明確

的速度，我們可以把計算平均速度所採用的時間差盡量縮短，但所得到的總是平均速度，還是無法求出在某些特定點上的確定速度。

棒球在第零秒時，位移為零，此時速度亦為零，兩者相除毫無數學意義可言。我們又再次遇到芝諾的另一個悖論——「飛箭不動」（arrow）悖論，芝諾認為射出的箭不會移動，因為在每一特定瞬間，箭的位移都是零。

無限小

或許瞬間速度的概念可以這樣表達，把計算平均速度所採用的時間差，儘量縮短，縮至無限小，此時求出的速度，即為瞬間速度。稍後，我們可以發現，這種概念正是解決長久困擾的好方法。由於人們不容易為無限小的數量下定義，因此這是否真能解決難題還挺有疑問的。不過，這個概念導出有力的數學工具，可以用來研究不斷持續變化速度的物體。

此時，這種全新的數學概念尚未具體發展完成，還有一些基礎工作有待進行。這一部分進展相當緩慢，科學家們花費了好幾年的功夫才發展出一個比較可行的運算方式。對科學家來說，「無限小」的概念太過新穎而怪異，以至於需要一番功夫才能運用自如。

耶穌會的卡瓦利力修士（Bonaventura Cavalieri）是第一位對「無限小」加以操作的數學家，他自認是伽利略的弟子。他證明可以將物體切分成無限多層他稱之為「無法再細分」的薄片（indivisibles），加總後可得知物體的體積。前面已提到的兩個實際的例子示範了卡瓦利力修士的運算程序，比如說，可以將圓柱體當成是無限個極薄圓碟組成的。

卡瓦利力修士始終無法確切說明何謂「無法再細分」，而他的運算方法也受到同時期數學家的強烈抨擊，他無法解釋為什麼無限多部分所組成的物體體積，竟然是有限的。卡瓦利力修士自己有時也描述自己的創見不過是一些方便的工具，目的僅僅是為了避免使用其他更複雜的數學方法而已。然而，縱使卡瓦利力修士無法說明他自己的創見，但是他的確向「無限小」的觀念前進了第一步。

卡瓦利力的想法吸引了少數思想家的興趣，其中包括法國數學家兼物理學家巴斯卡（Blasie Pascal）（他同時也是著名作品《沈思錄》Pens'ees 的作者）。根據巴斯卡的說法，「無法再細分」的方法與古希臘的幾何學的方法是完全一致的。能以其中一種方式證明者，另一方式亦必能證明。巴斯卡甚至說，任何自認為是幾何學家的人都不得不接受卡瓦利力修士的數學方法。

巴斯卡並不是唯一一位接受並運用卡瓦利力「不可細分」概念的數學家，法國另一位數學家費瑪（Pirerre de Fermat）以及牛津數學家華理士（John Wallis）也是。費瑪是法國Toulouse議會的顧問，平常以研究數學為樂，他習慣在書的空白處寫下自己的發現，後人對於費瑪研究「無限小」的成果並不是很清楚，最主要的原因還是因為費瑪並未將他自己的發現出版。華理士是英國皇家學會的創立者之一，他的成就則較為顯著，曾公開發表其成果，牛頓曾仔細研讀過他的作品。

最後的魔法師

英國經濟學家凱因斯（John Maynald Keynes, 1883-1946）在一九四二年為牛頓三百年紀念寫就的一篇文章中提到，「牛頓並不屬於理性時代的第一人，」凱因斯寫道，「他是最後的魔法師，他是最後的巴比倫人與蘇美人，他是最後的偉大心靈，用一種特有的眼光窺盡外在可見的世界及人類內在理智的世界。正是這種眼光，數千年來，為我們建立了西方世界的知識傳統。」凱因斯繼續說，牛頓視世界為上帝創造的一個巨謎，同時又留下線索，以便凡人得以解釋這個巨謎。

凱因斯的評論見人之所未見。今天，牛頓已經被認定是一位偉大的

科學家。然而，事實上，在牛頓一生中，他花在研究煉金術的時間與精力都比花在數學與物理上要多很多。牛頓逝世後，在他留下的手稿中，用了超過一百萬字的篇幅來討論煉金術和神學，其中祇有極少部分曾被印行出版。

伽利略曾為保衛科學理論而被控褻瀆教會，而牛頓則可稱之為異教徒。他根本否認基督教的三位一體說（按：指聖父（即上帝）、耶穌及聖靈三位一體。），他雖然相信耶穌不祇是一個凡人，但相信耶穌須順從聖父（即上帝）的意旨，耶穌與聖父不是一體的。他自然把這些想法藏在心底，如果這些想法公諸於世，他可能不會被告發，但是他將會失去在劍橋大學的教職以及被英國社會流放。因為，英國議會在一六七三年曾通過法案，准許清教徒進行公開禮拜儀式，但不包括任何在祈禱或寫作中反對神聖三位一體教義的人。

牛頓對於煉金術以及神學的愛好是否阻礙了他對科學的研究仍存疑，不過，牛頓對於科學的追尋的確表現出非比尋常的專注。他經常為了研究而廢寢忘食，也經常僅僅為了求解一個問題而徹夜不眠，渾然不覺時間的存在與飛逝。他甚至不太考慮這些科學探索是不是會造成身體傷害，有一次，他在研究視覺與光的本質時，乾脆直接目視太陽，以觀

察視線轉移之後所產生的後像。他也曾將粗針插進眼球與眼窩之間，祇是為了知道當他對眼球施壓，以致視網膜曲度改變時，會有什麼事情發生。

流通率

牛頓發明了一種全新的數學工具——微積分(differential calculus)。正如他慣有的作法，牛頓忘了將此一發明出版，大約在同一時期，德國數學家萊布尼茲也獨立地發明了微積分，因此牛頓和萊布尼茲之間為了誰先發明微積分，而引起一場尖銳爭執。這場爭執延續了好幾年，直到萊布尼茲在一七一六年過世之後還未停止。牛頓和萊布尼茲都被控剽竊，英國方面控告萊布尼茲偷去牛頓的想法，素來支持萊布尼茲的歐陸數學家，則指責牛頓從萊布尼茲的德文作品中，偷去流通率（Fluxion）的概念。

今日發明微積分的重要貢獻同時要歸功於牛頓與萊布尼茲兩人，雖然兩種方法的內涵相當，但萊布尼茲的運算方式較為通用，主要是因為萊布尼茲的方式較易於操作，而且較為方便的記述方式，至今仍廣為使用。相對的，牛頓以流通率概念操作微積分的古老方式則祇能在討論數學史的書籍中偶一可見到了。

如同許多在科學及數學上的創見一般，微積分的基本觀念其實相當簡單，牛頓直接解決瞬間速度的方法，是直接將瞬間速度定義為兩個無限小的值相除所得的結果，也因而找到可以記述兩個無限小之間的比值的方法。這是個全新的概念，因為其他研究「無限小」的數學家都僅僅將這些數「加總」起來而已，從來沒有人想過，如果當兩者相除時，會發生什麼狀況。

如果牛頓僅僅祇是製造了一個定義，他的貢獻便沒什麼了不得。畢竟「無限小」雖然有用卻有點怪怪的，在他之前，也沒有人給它一個適當的定義。牛頓的貢獻在於找出一個可以運用「無限小」來進行運算的方法，由於微積分的出現，才讓牛頓得以從遵循平方反比定律的萬有引力，推導出行星軌道為橢圓形的結論。也是依賴微積分的威力，才讓牛頓發現引力運算可以假定所有的質量集中在物體中心，如果沒有這個發現，牛頓的萬有引力定律將會變得非常累贅，而不是現今看到的簡潔形式。

由於微積分的出現，科學家得以處理物體運動，例如落體或是行星運動軌跡，這些物體都不作等速度運動，除此之外，微積分也可以用來描述任何隨時間變動的量，例如牛頓便曾經用微積分形式描述物體冷卻的過程：熱的物體並非以固定的散熱速率，將熱量散發出去。熾熱鐵塊散發熱

能的速度比起它僅有微溫時要快得多，祇有微積分能描述這種變化。

更有甚者，微積分也可用來描述在空間中變動的量。磁場就是一例，接近磁極時磁力明顯變強，遠離磁極時則變弱，在牛頓與萊布尼茲發明微積分之前，根本沒有什麼簡單的數學形式可以用來說明這種現象。所以說，微積分的發明可以被視之為有史以來最偉大的數學成就。

無限小到底是什麼？

「瞬間速度」可以被定義為兩個無限小之比，無限小的位移被無限小的時間除。這已經被證明是極其無價的創見，但到底什麼是無限小？沒有人說得清楚，包括牛頓與萊布尼茲。

牛頓曾經嘗試過幾次想要將「無限小」（infinitesimal）定義出來，但沒有一個定義是精確的。牛頓有時將「無限小」定義成「再也無法細分的數」（ultimate indivisible），有時定義為「近乎消逝而不可細分之數（evanescent divisible quantity）」，又有時是「初現的增量」（nascent increment），當牛頓寫《原理》時，用微積分形式推導出他的想法，並盡可能以微積分推導代替幾何學。很明顯的，牛頓想要利用微積分的形式讓他的作品看起來更可信。

萊布尼茲的作法比較乾脆，他不像牛頓一樣在定義上反覆推敲，他直接就用「接近於無的小」（Vanishingly small）或「無限地小」（Infinitely small）來形容。但是在他出版第一篇微積分論文之後的第十二年，他發現自己無法提出明確的定義。萊布尼茲友人，同時也是瑞士數學家的約翰及傑可布．白努利（Johann & Jacob Bernoulli）形容萊布尼茲所解說的微積分是「像是在出謎語」。五年之後，萊布尼茲寫下另一篇論文，其中形容無限小為「虛構的數」（fictitious number），即便如此，也無助於瞭解。最後，萊布尼茲終於放棄定義無限小的企圖。一六九五年，他寫道，「過於嚴苛」的評論不應阻礙人們使用已經證實有用的工具。

萊布尼茲提出的某些解釋聽起來的確令人相當疑惑。有次，在他寫給友人的信中寫道，「無限小不應當被視為是絕對而單純的零，而應當是相對的零。」這是一個近乎消逝的數，仍舊保有那些即將消失的數的特質。有時，他也說無限小是「沒有數量的形式（form without magnitude）」，有時他又否認有無限大或無限小的數量。

包括約翰．白努利與華理士在內的數學家試圖將無限小定義為以一除以無限大，但是並不管用。「無限」並不是一個確定的數值，像是一、五

或是七八三六九二一般，今日的數學家都將1／8當作是沒有定義的。白努利寫出第一本微積分教科書，在這本教科書中，出現這種令人費解的詞句：「一個數如果加或減去無限小，其值不會增加或減少」，白努利也試圖用類比來解說，但也好不到那裡。白努力曾經說過，無限大像是天文距離，而無限小則像是在顯微鏡下所看見的微小生物。這實在不是個適當的類比，天文距離容或極其巨大但絕非無限，而能被顯微鏡看到的單細胞生物也絕對不是無限小。

看起來整個微積分所賴以建構的基礎是相當脆弱的。更糟糕的是，在物理中的某些問題必須用到「二階無限小」（second-order infinitesimal）。「二階無限小」出現在物體有加速度的時候。瞬間速度的定義為：在無限短的時間內所運動的位移；而瞬間加速度則可視為無限短的時間內速度的變化，因此，加速度便牽涉到無限小的無限小。但是「二階無限小」到底是什麼？祇能說是一個看起來比無限小還要無限小的數。二階之外還可以推導出更高階的無限小，這又會是什麼呢？

一位離經叛道的數學家

一七三四年，英國哲學家柏克萊大主教（George Berkeley,

1685-1753）出版了一本書，標題是《分析學者，或給一位離經叛道數學家的論文》（*Anlyst or a Discourse Addressed to an Infidel Mathematician*）〔註：這個離經叛道的數學家是哈雷〕，其中檢驗了現代分析的目標、原則與推論是否是比神蹟或純信仰更有道理：「首先，讓你的眼睛發出光芒，然後你要清楚地看到且除去兄弟們眼中的灰塵。」在這本書中，他批評微積分建立在不合邏輯的基礎上，而談到無限小時，他說「這既不是有限的數，也不是無限小的數，更非一無所有，難道我們不能稱它（無限小）為死去數值的鬼魂？」柏克萊更說，「當有人仔細檢驗微積分的說明時，他將會發現其中充滿空洞、黑暗與困惑，如果我沒有錯的話，他還會發現完全不可能與彼此矛盾。」

你可能會想知道，為什麼一個否認物質世界存在的哲學家會如此關心祇在數學世界中存在的「無限小」，原因在於科學的進展使機械論與因果決定論等這些反對宗教神學的哲學思想，在哲學領域的影響力日益高漲，這使大主教柏克萊十分不安。他之所以批評「無限小」的觀念，是因為他認為這是當時（十八世紀）科學成果中的弱點，最適宜用來反擊科學的進展。

許多數學家試圖回應柏克萊的指責，但都不太成功，因為「無限小」

的本質的確是個未解的謎，而且在某些情形下，愈加辯解反而讓情形愈加不利。例如瑞士數學家歐伊拉（舊譯尤拉）（Leonhard Euler, 1707–1783）曾將兩個無限小相除的結果等同於零與零相除，他宣稱，0／0這個數可以等於任何數。歐伊拉是個偉大的數學家，但是他的結論在今日看來簡直一無是處。可見即便是偉大的頭腦，一旦碰到「無限大」或是「無限小」的時候也會變得迷糊。歐伊拉並不是第一次耽於思考無限的概念，還有一次，他認為-1（負數）大於無限，他認為無限就和零一樣，可以將正負數分隔開來。

一七八四年，柏林科學學院（Birlin Academy of Science）設置獎金要頒給對於「無限」的最佳解答者，這項競爭的聲明中，特別提到許哆數學中居然在使用含有矛盾的「無限」觀念，其中這樣寫著，「因此，本學院期待有人可以解答何以這麼多的正確理論，居然是由一個含有矛盾的假設推導出來。」

在參加這項競賽的論文中，大多以討論微積分與無限小為主，而在仔細研討過這些論文之後，主辦單位認為沒有一篇論文足以得獎，同時也沒有一篇論文內容可以稱得上清晰、簡明以及具體。主辦單位因而表示，「本學院認為，競賽所提出的問題並未被完全解答，」最後，評鑑委員會

將獎金頒給被認為最符合競賽要求的瑞士數學家拉烏勒（Simon L'Huiller），理由是「對於更高級微積分的基礎解說」，而拉烏勒的座右銘則是「無限是吞噬思考的地獄」。

整個十八世紀之中，科學家窮盡心力試圖為微積分找出合乎邏輯的立論基礎。然而，他們的努力不過是使事情更混亂。例如，伏泰爾（Voltaire）說微積分「是一種方法，用來計算某種人們還無法認識其存在的東西。」同時，法國數學家達蘭柏特（Jean Le Rond d'Alembert）告訴他的學生學習這些可疑方法還是有價值的，「微積分，」達蘭柏特說：「初見之下，也許覺得它不合邏輯，但信心終究會來臨。」

儘管困惑籠罩，微積分則越來越見成功。萊布尼茲與牛頓的成就被進一步延伸，微積分的出現引發數學上新的研究方向，數學與物理上無以數計的難題被一一解開，似乎無論微積分的基礎是否合乎邏輯都無礙於獲致正確結果。

極限理論

微積分的邏輯基礎終於在十九世紀確立。一八二一年，法國數學家柯西（Augustin-Louis Cauchy 1789-1857）出版了「解析教程（Cours

d'analyse）」，他提出如何消除無限小的擾人困惑的方法。柯西說明微積分可以建構在「極限」的概念之上。

在前面討論芝諾悖論時，我們已遇到這個概念。芝諾提出的「二分法悖論」，曾宣稱運動員永遠無法達到終點，儘管他越來越接近。即使如此，我們仍然知道運動員的終點目標的位置。同樣的，1、1／2、1／4、1／8、1／16……的數列雖然將越來越接近零，但永遠不會為零，其差別可以比任何有限數都來得小，但也不存在無限小的數。〔校訂者註：微積分的基礎並不完全由威爾史特拉斯獨立完成。狄德金(J. W. R. Dedekind）的極限理論、康脫的集合論與實數完備論（completeness）以及弗雷格(G. Frege）的數理邏輯都是實數理論的基石之一。〕

牛頓的流通率（現稱為導數 derivatives）原先被理解成兩個無限小數值的商，柯西換了另種定義。他先讓兩個有限數相除，再讓這兩個數越來越小，最後，他發現運算出來的商值將會越來越接近一個特定的值。伽利略的瞬間速度就是一個不錯的例子，讓我們回到本章一開始時，我所提出關於落體的假想實驗，我們想知道當物體掉落之後，經過一秒的瞬間速度，並想像我們可以每隔〇・一秒拍攝一次，這樣一來，我們其實祇得到十分之一秒內的平均速度。我們再進一步想像我們可以用千分之一秒的時

差加以拍照，再變成十億分之一秒的時差，依此類推下去，無論我們採用多短的時差，所得到都是平均速度，而非瞬間速度，但是當時差逐漸縮小時，兩者卻會越來越接近。假設我們所得到的數據是四・七，四・九，四・九九，四・九九九呎／秒的結果，將會越來越接近瞬間速度為五的結果，五便是極限值。

柯西認為他已經為微積分找到一個合乎邏輯的基礎。他的確找到了正確的概念，但是在試圖將極限的概念引進某些問題時，還是犯了一些錯誤。他的書中也有許多錯誤的假設與不正確的證明。接下去的工作便是把柯西的理論嚴謹化，這一點直到五十年後才由德國數學家威爾史特拉斯（Karl Weierstrass）完成，真正證明了微積分的立論基礎完全合乎邏輯。要說明威爾史特拉斯如何證明可能會過於複雜，這並不符合本書的期望，所以我寧可簡單地說威爾史特拉斯完成的工作相當偉大。

然而，不要以為這個麻煩的「無限小」概念從此消失。事實上，物理學家從來沒有停止使用過無限小的概念，他們的數學式中，常出現無限小等於某個東西。因為「無限小」提供了一個相當直觀的方式來研究事物。而且物理學家通常不重視數學推導的嚴謹，祇要能解決問題就好。

在大學中，經常可以發現，在數學系教的微積分是一回事，在隔壁物

理系教的微積分又是另外一套大不相同的東西，數學家小心翼翼的用極限來定義所有的概念，物理學家則直接跳過這一段。當我還是大學生時，我便發現了這項差異，那時我同時修微積分與物理，有些同學就是學不會微積分。那時，我的物理教授便推薦一本微積分的書，是由湯普遜（Sylvanus Thompson）寫的《輕輕鬆鬆學微積分》（*Caculus Made Easy*），我記得這本書將「導數」定義為「一個小東西」除以「另外一個小東西」，這其實正是牛頓所提出的定義。

「無限小」的回流

在二十世紀時，無限小的概念被重新引入數學，有些數學家開始思考是不是有可能建構出「無限小」理論的內容。一九三四年，德國數學家克萊恩（Felix Klein）建議放棄多數數學定理賴以建立的阿基米德公理（axiom of Archimedes）〔校訂者：按原書在此提的年代數字─一九三四或數學家人名有誤，因為克萊恩在一九二五去世，他不可能在一九三四年做此建議。〕

阿基米德公理指出，如果我們取用兩數A、B，設定A小於B，再讓A反覆自行加總，經過適當的次數，新的數將會大於B。舉個例子來說，

如果設定A為1，而B為25，祇要A自加26次便會大於B。

對於非數學家來說，這實在是一個淺顯易見的事實，根本不需要花時間來思考或證明，但是如果要嚴謹地處理實數系統則阿基米德公理是必要的。很顯然的，無限小無法滿足阿基米德公理，以至於無法在數系上找到「無限小」的位置，因為無論「無限小」自加多少次，都不可能大於任何一個已知的正數。

也許你會認為，放棄一個標準的公理不是一種正當的做法。其實不然，在牛頓的年代裡，沒有人去管什麼標準公理，但是到現在，數學家的想法大不相同，數學家們可以依照需要自行選擇適當的公理，祇要出來的定理不會自相矛盾即可。數學家看事情的方式和三百年前大不相同了。

在六〇年代，經由數學家羅賓森（Abraham Robinson）的努力，發展出「無限小」新理論。在這個被稱為「非標準分析」的理論中，「無限小」被定義為大於零，但是卻比任何正數為小的值。這個理論中也應用到超實數（hyperreal number），是普通數與無限小之和。例如，從無限小加六．三二的結果便是一個超實數。

基於超實數理論的微積分與柯西之前的微積分理論頗不相同，但有許多相似之處。定理的證明會不同，但最終應用於計算結果是一樣的。不管

物理計算或其他數學體系都不須更改，如此說來，「非標準分析」有何用？

「非標準分析」產生了一種新的「無限大」，和以前我們提過康脫的「無限大」不同。這是由普通數被「無限大」除得來的。因而，「非標準分析」豐富了「無限大」的概念。

有人揣測康脫很可能會不贊同目前正在進行關於「無限」的數學發展，由於康脫全然專注於處理「無限」的問題，而避免處理「無限小」。當另一位數學家提議用康脫的「無限數」理論來建構一個包含「無限小」的體系時，康脫會指控他企圖讓數學感染『無限小』的霍亂桿菌。

第五章

原子的災難

ATOMIC CATASTROPHE

記得當我還在中學時，第一次聽到這樣的問題：「如果在一個不可移動的物體上，施以一個不可抵抗的力，會有什麼事情發生？」這個問題對當時的我並不真的構成困擾，但是許多年後我才知道答案，「力就直接穿透過去了。」

說實在的，這個答案和問題一樣匪夷所思。這世間並不存在無限強大的力，也沒有什麼東西可以堅強到不被移動。從來沒有人真正看到過有什麼東西具備無限大的值。在物理學上，如果一個理論會弄出無限大，通常意味著在理論或是計算上犯了錯誤，或是該理論超出其應用範圍。

有時候，科學家難免會提到無限宇宙的可能性，即便如此，還是無法直接觀察到「無限」到底是怎麼一回事。假設宇宙存在的時間有一百五十億年之久，就表示人們不可能觀測到比一百五十億光年遠的事物，因為遙遠星體所發出的光還來不及抵達地球。一百五十億光年之外的物體對於地球不會產生任何影響，因為就算是宇宙中最明顯的遠距作用力─萬有引力也還是祇能以光速傳遞。

因此，人類能觀測到的宇宙是有限的，大約涵蓋半徑一百五十億光年左右的宇宙大球。當然，這個宇宙大球還是持續不斷地擴張，當宇宙年齡達到兩百億年時，我們就能觀測到兩百億光年的星體。然而，比起無限

大，兩百億光年僅僅是個微不足道的小數目。一個無限大的宇宙一定會涉及真實的「無限大」數，這將是大難題，因為所有的物理公式都祇能處理「有限」的數值。

發現電子

但是「無限」概念倒有助於近代物理學的發展。大約在一八九〇年左右，物理學家自以為已經瞭解了一切事物，物理學的主要兩個分支—力學(mechanics)與電磁學(electromagnetism)似乎已經足以解釋任何自然現象。力學處理物體的運動，包括天體與地表運動的種種現象。而由英國物理學家馬克斯威爾（James Clark Maxwell,1831-1879）發展的電磁學理論，不僅可以解釋電與磁的現象，也能說明光的行為。馬克斯威爾理論指出，光是電磁波。如果馬克斯威爾的理論正確，那麼在可見光頻率之外更高與更低的頻率都可能存在輻射線。這一點在一八八八年由德國物理學家赫茲（Heinrich Heztz）所證實。赫茲發現了無線電波，同時證明無線電波具備電場與磁場。一開始時，他認為無線電波以三分之二光速前進，但很快就修正過來，確定輻射波以光速前進，正如馬克斯威所預期的一樣。

一八九五年，當時部分知名的科學家仍然不相信有原子存在，但是他

們不得不承認，無論在物理或化學上，原子假說都是個有用而不宜排棄。一八六七年，英國物理學家湯姆生（William Thomson, 1824-1907）提出渦環理論（theory of vortex rings），並在一八九二年被擢升進入貴族行列，成為凱文爵士（Lord Kelvin）。在維多利亞時代，英國經常授與優秀科學家貴族地位或勳爵，這是過去未曾有過的榮譽。牛頓並未因為他是當時最偉大的自然哲學家（當時科學家都被稱為自然哲學家）而被封為牛頓爵士，他被封以騎士爵位，是因為他當了英國國家鑄幣廠廠長的緣故。

湯姆生認為，原子的形狀像是無法再細分的煙圈，而各個化學元素所表現出來的不同特性來自於這些小煙圈的變形，例如，鈉原子便是兩個互相串連的煙圈。湯姆生的渦環理論也可以解釋紅熱物體的發光現象：湯姆生假設煙圈可以振動，經由振動型態的改變，原子便可以吸收或放出能量，激烈振動的原子當然比緩慢振動的原子擁有更多的能量。

就一八九〇的標準來看，物理學理論已經近乎完備，牛頓定律解釋物體運動狀態；馬克斯威爾定律解釋電場、磁場以及電磁輻射，最後湯姆生提出的渦環理論則補上原子理論的缺口。就多數物理學家而言，物理學已經完成了。容或仍舊有些許物理問題難以解決，但終究會解決

的。畢竟，自然世界的基本定律都已經被發現了。科學家將繼續運用它們去解釋周遭的一切，遲早物理科學終將完備。

近代物理的誕生

從一八八七年到一八九五年的幾年之間，產生一連串物理學上革命性的發現：德國物理學家侖琴（Wilhelm Roentgen, 1845–1923）在一八九五年發現X光；四個月之後，法國物理學家貝克勒（Antoine-Henri Becquerel, 1852–1908）發現天然放射性物質。隔年，英國物理學家 J. J. 湯姆森（J. J. Thomson 1856–1940）發現電子。

在湯姆森發現電子前，英國物理學家已經為這個可能存在的東西建構理論。馬克斯威爾建議，「電的分子」(molecule of electricity)可能存在。這種用詞有點怪異，分子由原子構成，而電子是組成原子的成分之一，怎麼可以把「電子」說成是「電」的「分子」？可是，以當時的科學語言來說，「分子」和「原子」幾乎等於同義詞。「電的分子」就是「電的原子」，而「原子」是被理解為「最小而不可再分的單位」，「電的原子」就是「電」的最小而不能再分割的單位。

這個想法相當吸引人，可以對相當多在實驗時發現的電現象提出解

釋。因此，科學家企圖發現「電的原子」的種種特性。一八七四年，愛爾蘭物理學家斯通尼（George Johnstone Stoney）嘗試估計「電分子」的電量，他的估計值差了二十倍。當時科學家甚至不知道電子是帶正電或負電。然而，「電的原子」概念已廣被接受。一八九一年，斯通尼把這個尚未發現的微粒子命名「電子」（electron）。

湯姆森在六年之後發現電子，雖然，他無法直接測量到電子的質量或是電量，但是他測量出電子的質荷比（ratio of mass to charge）（電子質量與電荷之比）。他發明一種相當聰明的方法來計算電子的質荷比：湯姆森知道帶電物體受電場及磁場的影響不同，電場加於帶電粒子力量大小祇與電荷有關，而磁場所施的力量，不僅與電荷有關，還與帶電粒子運動的速度有關。因此，湯姆森設計了一個實驗，利用調整電場與磁場的強度，讓電子所受的力量達到平衡，如此，可以計算出電子運動的速度。他得到兩個方程式：一個與電量有關，另一個則和電量與速度有關，兩者合併，便可以在計算式中消去電量。

現在，如果湯姆森知道電子的質量，便可以測出電子的電荷。祇需將磁場切掉，這時電子在電場的吸引下，其原有的行逕將會偏折，測出偏折程度及電場強度，便可算出電子的電荷。但是，在電子質量未知的情形

下，湯姆森祇能計算出電子的質量與電荷之質荷比。

湯姆森發現這個比值相當小，這意味著電子的質量比原子要小上許多，甚至比最輕的氫原子都要小。如同所有原子一樣，氫原子也是電中性的原子，它包含一個帶正電的質子以及一個環繞著質子運行的電子，兩者質量並不相近，質子的質量是電子的一八三六倍。

布丁電子模型

在一八九〇年代晚期，科學家們對於原子結構並不瞭解。原子如果包含數千個電子，看起來是滿合理的。假如氫原子中有九百個電子，便會佔去總質量的一半。依照這個比例來算，氧原子就會有一萬四千到一萬五千個電子，鐵原子將有五萬個電子，金原子則有十八萬個電子。

當時存在兩種理論來解釋原子的結構。日本物理學家長岡本太郎（6Hontaro Nagaoka）認為電子形成環狀的負電圈繞著球形的正電團運轉。長岡本太郎的原子模型看起來像是有行星環的土星。這個模型有致命的缺點，根據馬克斯威爾的電磁理論，以圓形或橢圓形軌道運行的電子會持續放出輻射。如此，電子將會失去能量而墜落在正電團表面，如此長岡本太郎的原子就不穩定。

另一個理論是由凱文爵士（此時他已經放棄他的渦環理論；電子的發現使得這個概念變得站不住腳）和J.J.湯姆森提出來的，這個理論認為電子是在正電球體中，但是一樣面臨電子能量損失的問題，因為無論將電子放置在何處都將放射能量。然而，湯姆森希望經由電子結構的安排可以將能量的損失降到最低。凱文—湯姆森理論日後被稱為葡萄乾布丁模型（plum pudding model），帶正電的球體是布丁，電子則是嵌在布丁內部的葡萄乾。

一九〇六年時，湯姆森根據理論已經能推論出在原子內電子數目應當要比原先假定的少。他分別採用三種不同的方法：其一採用有關光線穿透透明物體體時引起交互作用的數據；其次是X光與氣體間的交互作用，第三是快速電子在物體中被吸收。在這過程中，湯姆森都假定電子在原子中扮演重要角色。這三項研究的結論讓湯姆森相信原子中的電子數目應當更少。事實上，氫原子可能僅含有一個電子，其他元素中原子的電子數也很少。但是他並無法確定電子數目。比如說，他計算出來的氧原子中，其電子數便在三到三十二之間。實際上，氧原子有八個電子，不過這比起原先估計氧原子有一萬五千個電子要好太多了。

原子核的發現

湯姆森的原子理論相當具有創見，但很快地便被新的實驗所推翻，在一九一一年，英國物理學家拉賽福（Ernest Rutherford 1871-1937）宣稱他已經利用實驗證明電子並不是在一個帶著正電的球體內運動，相反的，正電集中在原子的中心，形成體積微小的原子核，而原子的主要重量也集中在原子中心的微小原子核。

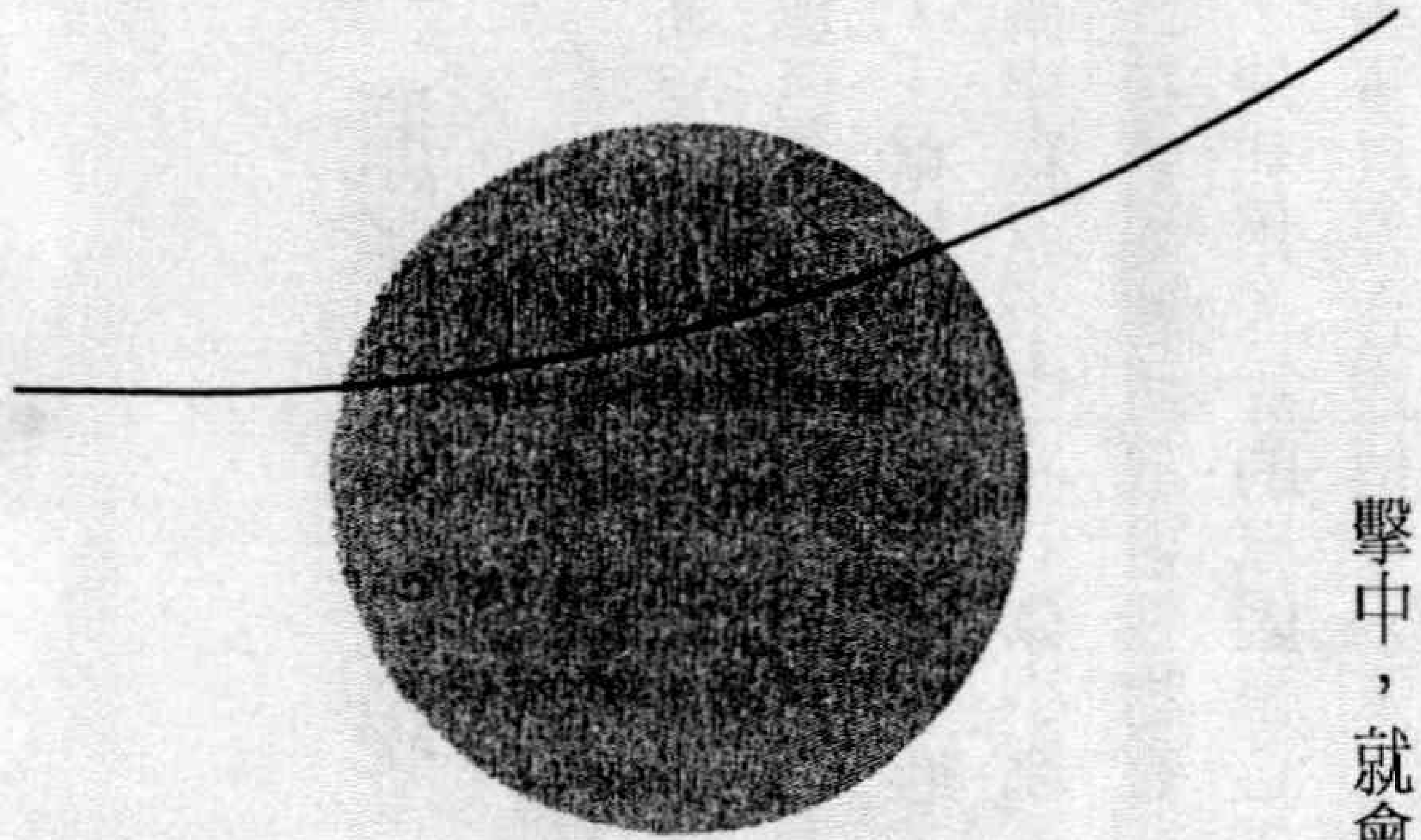
拉賽福利用放射性物質所放出的阿爾發射線撞擊金箔及其他物質的薄片。他利用薄片的原因是希望可以讓阿爾發射線可以穿透，純金打造的薄片正可以符合這個需求。

我們現在知道阿爾發射線是由兩個質子與兩個中子所組成，但在一九一一年時，中子還未被發現，所以人們並不瞭解阿爾發射線的實際組成成分。不過，可以測量出他們帶正電，而且比電子重了幾千倍。

拉賽福認為如果湯姆森的理論正確，那麼用阿爾發射線撞擊金箔的結果，應當不會有太多折射的情形出現，因為阿爾發射線比電子重許多，因此電子應當不至於對於阿爾發射線的行進路線造成太大影響，因為阿爾發射線和電子之間的碰撞正如同戰艦與小船相撞一般，唯一的差異祇是電子

不會被摧毀。但另一方面，擁有大部分質量的正電球體將會把帶正電的阿爾發射線稍微推離運行方向。

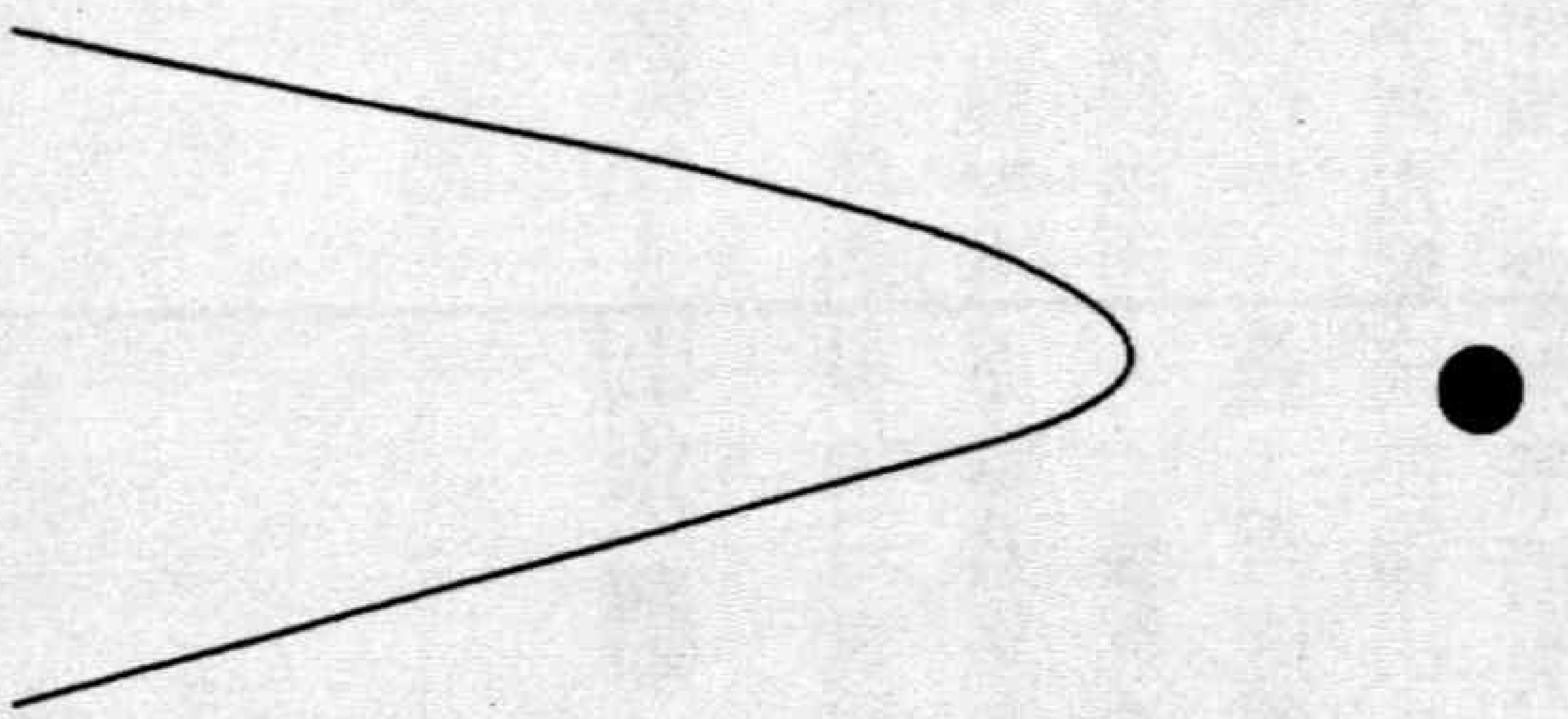
要瞭解拉賽福的實驗，可以從下面這個例子來瞭解：假設有人用槍射擊幾百碼外大約有籃球大的布丁目標，他所用的子彈是大約有高爾夫球大小的鐵製彈子。如果鐵彈子擊中布丁，將會直接穿透，至多祇會稍稍偏離一點點，但是如果擊中的目標是一個小金屬球，就會出現大角度的反射，由於這個目標體積很小，因此錯失目標的機會很大，然而一旦擊中，就會被彈開，甚至可以大到與原行進方向相反。



當拉賽福開始他的阿爾發粒子撞擊原子的實驗時，人們相信原子是由正電球體以及包圍在外的電子所組成。因此他期待見到阿爾發粒子最多以小角度偏斜。在這裏祇顯示出阿爾發粒子的路徑和假設中的帶正電球體是偏斜的；電子——由於並沒有預期它會對阿爾發粒子產生顯著影響——所以並沒有在圖上顯示出來。

當阿爾發粒子與金原子碰撞的時候，並不是真正的碰撞，但是效果倒是類似。阿爾發粒子與金原子核之間會因為正電互斥的效應而彼此排斥，由於金原子的重量要比阿爾發粒子重上五十倍，因此阿爾發粒子將會被彈開，彈開後行進的方向取決於一開始時，以阿爾發粒子射擊金原子核時，與金原子核的距離有多接近而定。

拉賽福進行實驗時，他發現大部分的阿爾發粒子都能通過金箔，少部分的阿爾發粒子會呈現大幅度的折向，折射角甚至大於九十度，亦即有些阿爾發粒子會反彈回來。這意味著原子的正電集中在一個很小的區域中，這和先前的布丁模型大不相同。



在實驗進行時，有些阿爾發粒子會有大角度的折向，唯一可能的解釋就是原子的正電集中在一個很小的區域中。在這個圖中，帶正電的阿爾發粒子被帶正電的原子核強烈彈開，同時也明白地顯示出改變的方向。再一次，原子內的電子並沒有顯示在圖上。

原子的災難

原子核的發現是實驗物理上的重大突破，但是這卻引起理論物理的大災難。湯姆森原本希望布丁模型可以解決電子輻射能量損失的問題，在拉賽福的模型中，一樣無法解決這個問題，電子必須圍繞原子核運行，如同太陽系行星一般，否則便會因為正負電彼此吸引而掉落到原子核上。但馬克斯威爾電磁定律指出：電子環繞原子核運行時會輻射出能量，會使原子急速崩潰。當電子損失能量時，將會迴旋著向原子掉落；越向原子核靠近，原子核對電子的吸引力越大，電子損失的能量越多，吸引力的增加造成電子運動的速度變快，散失的能量也越大，電子會在萬分之一秒內墜落在原子核上。如果拉賽福模型與古典物理學都是正確的，那麼將不會有原子或是任何物質存在，當然更不用說物理學家本身了。

英國物理學家兼科普作家達維斯（Paul Davies）認為電子在這種情形下釋放的能量將達到無限大。達維斯假設電子與質子都是不佔空間、沒有大小的幾何點，這種假設並不荒謬，後面我們將指出有相對應的理論支持這種假設。另一方面，今天我們認為原子核中的質子不祇是一個幾何

原子的災難

原子核的發現是實驗物理上的重大突破，但是這卻引起理論物理的大災難。湯姆森原本希望布丁模型可以解決電子輻射能量損失的問題，在拉賽福的模型中，一樣無法解決這個問題，電子必須圍繞原子核運行，如同太陽系行星一般，否則便會因為正負電彼此吸引而掉落到原子核上。但馬克斯威爾電磁定律指出：電子環繞原子核運行時會輻射出能量，會使原子急速崩潰。當電子損失能量時，將會迴旋著向原子掉落；越向原子核靠近，原子核對電子的吸引力越大，電子損失的能量越多，吸引力的增加造成電子運動的速度變快，散失的能量也越大，電子會在萬分之一秒內墜落在原子核上。如果拉賽福模型與古典物理學都是正確的，那麼將不會有原子或是任何物質存在，當然更不用說物理學家本身了。

英國物理學家兼科普作家達維斯（Paul Davies）認為電子在這種情形下釋放的能量將達到無限大。達維斯假設電子與質子都是不佔空間、沒有大小的幾何點，這種假設並不荒謬，後面我們將指出有相對應的理論支持這種假設。另一方面，今天我們認為原子核中的質子不祇是一個幾何

點，而是有大小的，因為科學家發現質子是由更小的粒子所組成，這些粒子稱為夸克（quark）。不過，夸克要等到五十年後才被發現。在二十世紀初期，科學家認為電子與質子間的差異並不大，至多祇是質子比較重，而且帶的是正電。

如果電子和質子，是不佔體積的幾何點。那麼當電子塌落到質子時，將會放出無限大的能量。當電子失去能量時，將會越來越接近原子核，這樣的吸引力會使電子的速度越來越快，這和彗星接近太陽時，速度會越來越快的道理是一樣的。當電子開始快速移動時，能量散失的速率也越來越快。電子最終撞上質子時，能量釋出的速率將變成無限大。

二十世紀初的科學家並不擔心這個問題，在他們的想像中，這正是原子之所以存在的原因之一。達維斯的例子反而證明了原子災難的問題是何等難以解決的問題。根據這個原子模型，形成任何一個原子都會產生了一個大爆炸。

紫外線的災難

想要瞭解原子如何能夠存在的原因，以及如何解決原子崩潰的問題，就必須回頭看看本世紀初另一個關於「無限」的問題。這個問題涉及預測

紅熱發光體散熱率的數學公式。當找出答案之後，便直接導致量子理論（quantum theory）的誕生。

科學家在建構理論時，通常會先想像在理想狀態下的情形，當簡化狀態下的問題被解決之後，再考慮更複雜的狀況。物理學家在研究紅熱物體時，第一個考慮的就是黑體(blackbody)。黑體會吸收任何落在表面的能量，如果真有黑體存在，必然是黑色的，因為黑體將吸收落在表面的光線，而不會讓光線反射出來。

自然界中並不存在真正的黑體，但是在實驗室中倒是不難模擬黑體的狀態，衹要在一個中空球體上鑽個小洞就可以模擬黑體。任何光線或是輻射的能量衹要進入這個小洞內，無論如何反射都無法逃出這個中空的球，最終的結局就是被吸收。如果對這個中空球體加熱，內壁將會發光，而這些光又會被吸收，因此將可以模擬黑體吸收一切能量的狀態。

根據二十世紀初的物理理論，電子振動產生光線，雖然這樣一來會使得原子不穩定，但是卻能夠計算出電子在原子內，若以特定型態振動，則會輻射出光線或電磁波。因此，人們就可以根據電磁學計算出，物體幅射出的光波強度，如何因波長的不同而變化。不同波長的光所輻射出的光量並不相同，不同波長的光對應出不同顏色的光。因此一塊紅

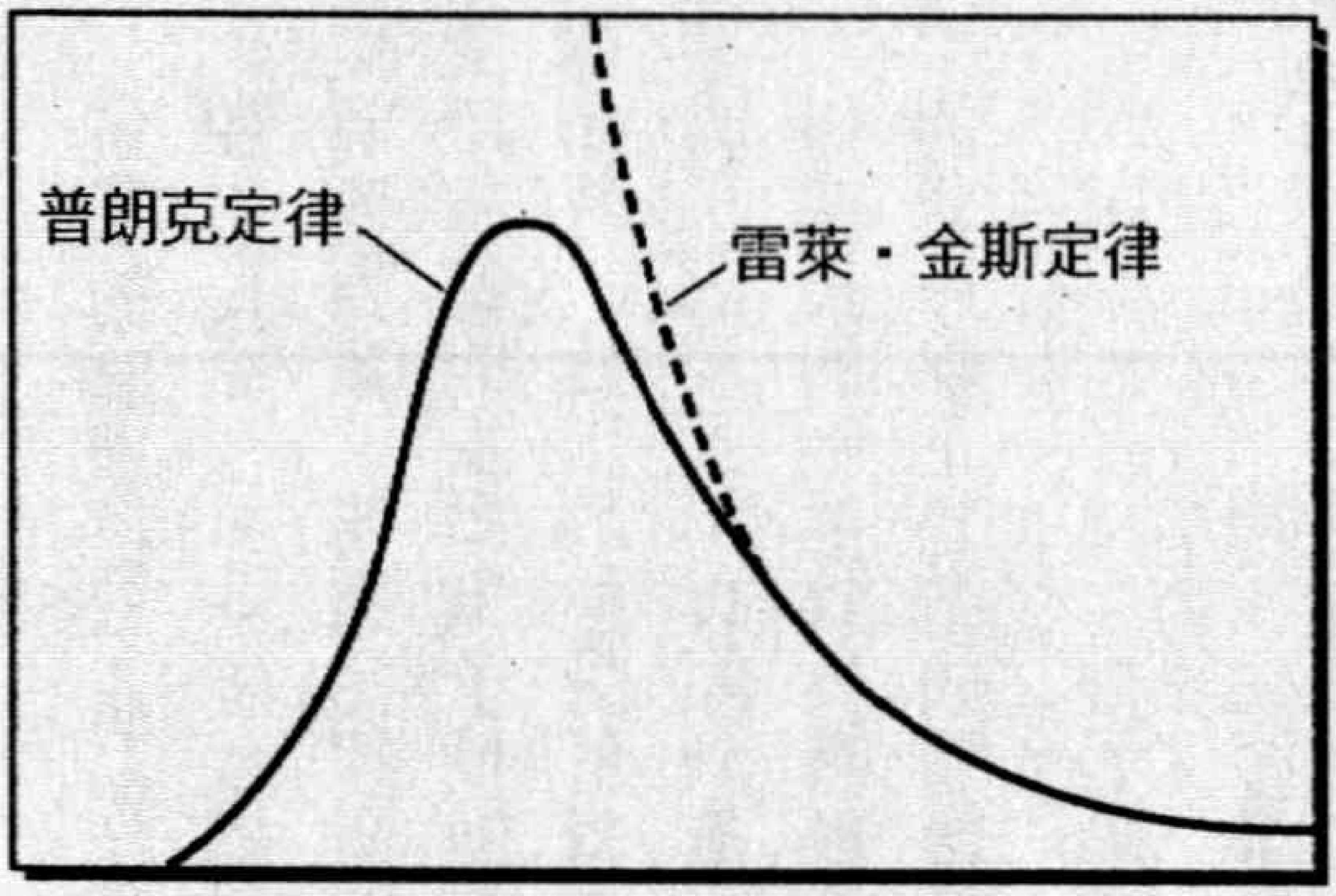
熱的鐵輻射出較多紅色波長的光。

物體輻射出光熱時，不同的波長其輻射強度並不相同。這種輻射波長的分佈型態，又會隨著那個物體的溫度而變化。在鐵塊被加熱的過程中，一開始時顏色不會改變，因為此時放出的電磁波都是紅外線，超出人類視覺極限。繼續加熱，將會使鐵塊變紅，再加熱，則會變成白色。英國物理學家雷萊爵士（Lord Rayleigh, 1842-1919）認為這個過程可以用數學公式來描述，但是他始終無法從理論中得出一個正確的結果。

理論上的困難

雷萊的確發現一個數學公式，後人稱為「雷萊．金斯定律」（Rayleigh-Jeans law），英國天文學家金斯（James Jeans）也對這個數學公式有所貢獻。雷萊定律對於長波長區段的預測相當準確，在長波長區，雷萊所根據的振動電子模型似乎是正確的。然而。雷萊定律預測當波長越來越短時，放出的能量將越來越多，事實上，他預測釋放出的能量會達到無限大，因波長可以短到無限小的地步。

短波長的輻射線具有較多的能量，例如紫外線就比可見光能量強，陽光中的紫外線正是造成曬傷的主因。如果陽光中祇有可見光，那麼無論在



一個正在形成的物體會放射出不同波段不同數量的能量。本圖是一個典型的例子。紫外線波長是在左邊，紅外線波長是在右邊。「雷萊・金斯定律」對於長波長區段的預測相當準確，並預測在無限短波長時，釋放出的能量會達到無限大。
此圖亦顯示出普朗克定律的預測。關於普朗克定律的詳細內容參見內文之討論。

陽光中待多久，都無須擔心曬黑或是曬傷。X光與伽瑪射線的波長比紫外線更短，威力也更強大。

當物理學家在一八九〇年代開始和黑體輻射理論搏鬥時，還不知道X光就是電磁輻射的一種。奧地利物理學家艾倫費斯特（Paul Ehrenfest）將具備無限大能量的電磁輻射稱為「紫外線災難」（ultra-violet catastrophe）。

如果真有「紫外線災難」效應存在，那就真的會造成大災難。如果輻射能量因輻射波的波長縮短而確實迅速增加的話，那麼，隨便加熱個什麼

東西，就會放出巨大的能量，巨大到可以蒸發整個地球、太陽系、銀河系，甚至整個宇宙。在這種情況下，吸煙絕對是對有害的，因為祇要有人點起火柴，馬上就會摧毀整個宇宙。

德國物理學家維因（Wilhem Wien, 1864-1928）在實驗室研究黑體輻射之後，發現黑體輻射與溫度間的關係的公式，這個公式也可以由熱力學理論推導出來。但是維因的公式仍舊有缺陷，在短波長時可以很準確，但是當波長逐漸變長時，誤差也隨之增加。

到了十九世紀末，物理學家發展出兩套公式來描述黑體輻射。雷萊・金斯定律（Rayleigh-Jeans law）適於描述波長較長的黑體輻射，但是在描述短波長時，會找不到無限大；而維因定律（Wien's Law）則適於說明短波長時的情形，對於長波長卻無能為力。科學家無法解釋一個看似簡單的物理現象——紅熱物體的放射能量。

不情願的革命者

德國科學家普朗克（Max Planck, 1858-1947）在一九〇〇年時解決了黑體輻射難題。他找到一個可以同時解釋長波長與短波長的公式。他不斷嘗試各種數學式子，最後他得到一個像是可以解釋實驗結果的公式，接著

他要研究這個拼湊出來的公式，如何可以從物理理論中推導出來。他驚奇地發現必須假設光線是以粒子的方式輻射出來，公式才能成立。輻射光的能量不再是無限地可分割，而是有不可再細分的最小能量「包」，或稱為能量量子（quanta of energy）。紅熱物體在一定時間內，祇能放射出一定數量的能量量子，可能是一個或兩個能量量子，或一百億個，但絕不可能輻射出一個半，或是其他非整數的數量的能量量子。這就是有名的普朗克量子理論。（planck's quantum theory）

普朗克是個保守的古典物理學家，對他來說，光線早就被論證為具備波的性質，很難想像黑體輻射會以量子的方式來放射能量。波以連續性的方式傳播能量，而不是將能量分成一個個的小單位，然而這卻是解釋黑體輻射唯一可行的解答。幾年之後，普朗克形容他引進「量子」的觀念是無可奈何的事。他在研究黑體輻射上已經投入六年時間，他決定要「不計代價」找出解答。

當時的物理學家大都反對普朗克的看法，而在普朗克發表黑體輻射量子說之後五年內，也不太有人注意到他的理論，但是在這段時間，普朗克又繼續努力尋找一些更合理的方法來修正他的數學公式。他根本沒有預期到他的假設會是正確的，更不用說預料到後世會認為他是二十世紀物理革

命的發動者。

然而，卻有一位科學家相信普朗克的量子說，那就是愛因斯坦。一九〇五年，愛因斯坦大膽地預期光以能量量子的形式傳遞，如同粒子一般。他比普朗克更進一步，因為普朗克完全不曾觸及光在空間中的行進方式。普朗克僅僅假設黑體輻射以量子的方式放出能量，但是在空間中仍以電磁波形式行進。

當然，後來證明愛因斯坦的說法完全正確。今天我們將光的粒子稱為「光子」（photon），而且知道光具有波與粒子的雙重性質，但是在一九〇五年，這真稱得上是相當詭異的看法，即便它可以解釋在實驗室裡的種種現象。保守的普朗克完全不能接受，但是他卻相當欣賞愛因斯坦研究的品質，並在一九一三年推薦愛因斯坦成為普魯士科學院（Prussian Academy of Science）的成員。在普朗克的信中曾經這樣說道：

「有些時候，他的推測難免有錯，例如他的光量子假設，但這不能成為反對他的理由。因為，在科學上引介新觀念時，難免要冒風險。」

波耳的氫原子的量子理論

一九一三年，就在普朗克引介愛因斯坦進入普魯士科學院的同一年，

丹麥物理學家波耳（Niels Bohr 1885-1962）發表了關於氫原子的量子理論。波耳認為利用量子理論可以避免原子崩塌的問題。即便波耳的理論事後證明並不完善，但仍不失為一種革命性的發現。這是科學家邁向瞭解次原子世界的第一步。

如果波耳年輕時再更圓滑些，或是他能夠更熟練地運用英語，也許他就不會有這麼偉大的成就，至少也會延緩發明量子理論的時間。波耳在一九一一年取得哥本哈根大學博士學位後，前往劍橋跟隨 J. J. 湯姆森在當時首屈一指的卡文第西研究室（Cavendish Laboratory）裡工作。湯姆森在實驗室裡笨手笨腳的，以至於當時有人取笑湯姆森，認為不應該讓湯姆森接近自己的實驗設備，以免造成破壞。但是湯姆森在設計研究方法上卻創意十足，湯姆森的研究助理中就有七位因為受到湯姆森的啟發與嚴格的訓練，而各自成為諾貝爾獎得主。

波耳和湯姆森的首次會面並不是很愉快，在他們會面的過程中，波耳隨手拿起湯姆森的著作《氣體中電力的傳導》（*Conduction of Electricity through Gases*），翻開其中一頁，指著其中一項數學方程式，對著湯姆森說，「這式子錯了。」在經過幾次令人侷促不安的會面之後，每當波耳靠近湯姆森的實驗室時，湯姆森都會繞開，不想與波耳碰面。有一陣子，波

耳埋首於自己的研究、上課。最後選擇離開劍橋，前往位在曼徹斯特的拉賽福實驗室。

當波耳來到曼徹斯特時，他早已熟悉拉賽福的行星原子模型，但是還無法發展出自己的模型。波耳不知道原子所含的電子數量，雖然當時的物理學家已經不再相信一個原子含有數千個電子，但是確實有幾個，還是不知道。

提倡天擇論的生物學家查理·達爾文（Charles Darwin, 1809-1882）的孫子查理·高頓·達爾文（Charles Galton Darwin）也在拉賽福的實驗室裡工作，他的工作內容主要是計算當阿爾發射線通過物質時所損失的能量。當波耳將自己的研究與達爾文的研究結果整合起來之後，他發現有強烈的證據指出氫原子核外圍僅含有一個電子。

波耳在曼徹斯特待的時間並不久，僅僅祇有四個月。但是他已經找到他的量子理論所需的重要依據，如果不知道原子中含有多少電子，則他根本無法解釋原子的行為。

原子理論

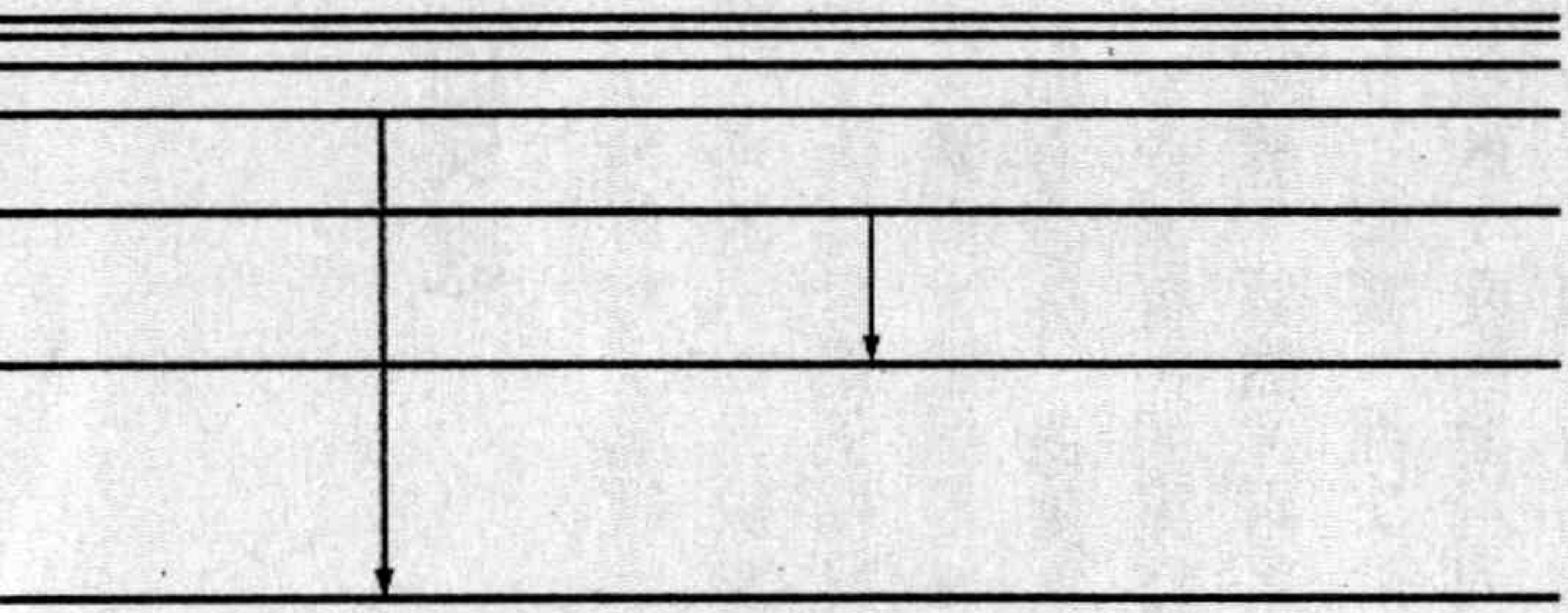
當波耳發表他的氫原子理論時，他假設電子以圓形軌道繞原子核運

行。其次，他假設佔據特定圓形軌道的電子不會放出能量，這是物理史上最具革命性的假設之一。乍看之下，這似乎違反了基本物理定律，馬克斯威爾的電磁定律就指出任何以圓形軌道運行的帶電物體都將放出能量，實際上也是如此。現代科學家建造巨大的圓形加速器，將電子施以能量，加速到極高速，所產生的輻射就稱為「同步輻射」（synchrotron radiation）。如果電子運動的速度夠快，那麼將會放出位在X光頻率區的高能輻射，這些X射線可供進行許多實驗之用。

假設繞行原子核的電子不放出能量祇是第一步，波耳還假設祇有特定的某些軌道才可能會有電子存在。在佔有距原子核較遠的軌道的電子具備較高的能量。當電子從較高軌道跳到較低軌道時，會放出特定的能量，以光的形式釋放出來，這正是普朗克所稱的光量子。反過來，電子也可以透過吸收一定的能量，而從較低軌道跳到較高軌道。在所有電子可以存在的軌道中，能量最低的一個軌道稱為「基態」（ground state），位於基態的電子已經是在最低的軌道，不會再放出能量。

在波耳的理論中，有無限多個可能軌道，而相鄰軌道之間的距離則是有限的，因此原子最外緣的軌道的半徑將為無限大，圓周長度也是無限大。這和原子崩塌，或是紫外線災難不一樣，無限多個軌道並不會造成無

法解釋的困境。舉例來說，如果太陽系的狀況有所改變，地球繞日的軌道也會有所改變，因此就會有無限多個可能的軌道。同樣的，在波耳的氫原子理論，原子內的軌道也會有無限多個。一個電子一次僅能佔據一個軌道，實際上，距離原子核太遠的軌道沒有意義，因為電子距離原來原子核太遠之後，便容易被其他原子核所吸引。



在波耳原子中，一個電子的能階圖。
一個原子內有無限多個可能的能階。當能量越來越大時，能階與能階之間的空間變得越來越小。如果一個電子的能量大於最高能階的能量，它就會被踢出原子之外。
圖上的垂直線表示兩個能量量子從一個能階跳到另一個能階。兩個都是由高能階向低能階躍遷，因此電子會釋放出光子來。

負面反應

波耳成功地解釋了氫原子的大部分行為，這個模型也成功地預測對氫氣體通電後，所放出的光線波長。另外它也說明了為什麼不會有原子崩塌的情形發生，因為當電子位於基態軌道時就不會再放出任何能量，而墜落於原子核上。然而，這個理論並未立刻被接受，甚至引致負面反應。當波耳的理論公開發表後，德國物理學家史登（Otto Stern）以及勞爾（Max Von Laue）彼此發誓，如果這個瘋狂的理論被證實是正確的話，兩人將一起離開物理學界。當然，兩人後來都沒真的離開。勞爾後來以他對X光的研究而獲得諾貝爾獎，而史登對量子理論也做出重大貢獻。

正如預期的，愛因斯坦的反應就與眾不同，他表示他自己曾有類似的想法，但是沒有足夠的勇氣繼續發展下去。然而，愛因斯坦還是屬於少數支持這個想法的人，大部分的物理學家抱懷疑態度。理由之一是指責波耳的理論祇能解釋氫原子的行為。如果要進一步解釋更複雜的原子，例如稍微複雜的攜帶兩個電子的氦元素，結果則錯得離譜。這個理論似乎祇適用於攜帶一個電子的元素或離子。

我們現在已經瞭解這個限制的由來，一九二六年，一個比波耳理論更

精確的量子力學發展出來了。從此人們才發現，兩個電子間會產生以往所不知道的互動關係，因此波耳理論不能成功地描述氦元素的原子。在當時，人們還不可能理解雙電子系統（氦原子）的電子行徑。

拉賽福一開始時就相當讚賞這個理論，他在一九一四年這樣寫著，「波耳的理論對建構簡單原子與分子的結構與其光譜，邁出了決定性的第一步。這對於所有的物理學家來說，都極其重要，對物理界也相當有幫助。」拉賽福並未幫波耳理論背書，他僅僅表示，要判定該理論是否正確還太早，不過，這個理論卻很重要、也很有趣。這是拉賽福的典型作風。他相信祇有實驗物理才是真正的物理學，「事實」祇存在於實驗之中。他有時用諷刺的方式來表達這種態度，例如有一次，著名科學學報《物理年鑑》（*Annalen der Physik*）的主編物理學家維因跟拉賽福說，盎格魯薩克遜人中沒有一個人可以理解愛因斯坦的相對論，拉賽福則冷笑地回應說，「不，他們已經瞭解得太多了。」拉賽福是個偉大的實驗物理學家，但是他卻盡可能避免涉及任何理論物理的議題。這也許可以說明為什麼波耳和拉賽福的關係要比波耳和湯姆森的關係要好。

拉賽福對波耳的態度倒不是全然同意，即便他公開在期刊上誇讚波耳，但是在私人信函中似乎相當反對，他在一九一三年寫給波耳的信中寫

道：「你的假設中有個致命的錯誤，因為電子看起來似乎自己知道要停在什麼地方。」當拉賽福這樣寫時，他正指出波耳理論的關鍵，當電子位在最高能軌道時，電子可以有幾個可能的低能軌道可以停留，但是電子要去哪裡？波耳理論中並未說明。他也沒有解釋電子第一次跳躍時是如何發生，波耳與拉賽福都無法說明這一點，但是在物理科學史上，從因果確定論的古典物理世界邁向或然隨機的量子世界的第一步，已經跨出了。

量子力學的奇妙世界

量子力學是由德國物理學家海森堡（Werner Heisenberg, 1901-1976）在一九二五年所發展出來。量子力學幾乎是所有近代物理的基礎，因此量子力學的發現可以說是二十世紀中最重要的科學進展。即便如此，雖然海森堡的理論吸引了許多一流物理學家的注意，但是一開始進展並不是十分順利。海森堡運用當時多數物理學家還很陌生的數學工具——矩陣（matrice）來計算。此外，這個理論無法為次原子世界提供具體直觀的意象。物理學家們傾向於在腦中建構一個具體的影像，以便於操作及想像，但是海森堡的理論做不到這一點。

這個不利情況很快就過去了。在一九二五年冬天，奧地利物理學家薛

丁格（Erwin Schrö dinger, 1887-1961）利用不同的假設，建立了一套稱為「波動力學」（wave mechanism）的理論。薛丁格在阿爾卑斯山度假時，想出這套理論。他把妻子留在家中，自己帶著幾本科學筆記（以及女友）前往臨時租用的山莊，就在度假時，他很快地便完成了一個描述次原子世界的全新理論。

在薛丁格的理論中，粒子被形容成散布在空間的波。正像光一樣，物質被形容為具有波與粒子的雙重性質，但是這還是沒有清楚交代物質波到底是什麼東西。它不像光波是由電場和磁場的波動所構成。物質波是相應什麼「場」的波動呢？然而，薛丁格的理論用在計算原子行為上卻能得到正確的結果。

一時之間，人們認為有兩個全新的理論可以用來描述次原子粒子的行為。但是科學家馬上發現海森堡的量子力學與薛丁格的波動力學在數學上是相等的，即使外表看來，兩者頗不一樣。但是兩人之間彼此看不順眼，都挑剔對方的理論。海森堡在一次與奧地利物理學家鮑立（Wolfgang Pauli, 1900-1959）的對話中，他批評薛丁格的理論「令人作嘔」、「垃圾」，另一方面，薛丁格也批評海森堡的方法「令人厭惡」。時到今日，兩人都被視為量子物理的發現者，而海森堡的版本稱為「矩陣力學」

（matrix mechanics），以與薛丁格的理論有所分別。

一九二六年之前，量子力學吸引了無數物理學家的注意，很快地便發現量子力學可以正確地描述氫原子的行為，以及解決許多原來令人百思不解的問題。但是，最基本的問題還在：「到底薛丁格的波是什麼東西？」這個問題在一九二六年獲得解決。當時的德國物理學家波恩（Max Born, 1882-1970）認為可以理解為這是用來描述機率的波，和光波或水波大不相同。舉例來說，電子最傾向存在於機率波的波幅最高處，在機率波接近零的地方就不可能找到電子，因為此處的機率為零。〔按：嚴格說來，電子出現的機率，是與機率波幅絕對值的平方成正比，而不是與機率幅本身成比率。〕物理學史上，這是第一次物理學家無法指定物體在空間中的具體位置。

對這個理論最無法接受的人可能是薛丁格本人，和普朗克一樣，薛丁格是個保守的古典物理學家，他原本希望藉由波的描述方式可以避免量子跳躍的說法，使得古典物理學中對於原子的看法得以保存。有一次，在和波耳的一連串會談中，薛丁格甚至說，「如果你一定要堅持有量子跳躍的話，我希望我從來沒有研究過原子理論。」

（matrix mechanics），以與薛丁格的理論有所分別。

一九二六年之前，量子力學吸引了無數物理學家的注意，很快地便發現量子力學可以正確地描述氫原子的行為，以及解決許多原來令人百思不解的問題。但是，最基本的問題還在：「到底薛丁格的波是什麼東西？」這個問題在一九二六年獲得解決。當時的德國物理學家波恩（Max Born, 1882-1970）認為可以理解為這是用來描述機率的波，和光波或水波大不相同。舉例來說，電子最傾向存在於機率波的波幅最高處，在機率波接近零的地方就不可能找到電子，因為此處的機率為零。〔按：嚴格說來，電子出現的機率，是與機率波幅絕對值的平方成正比，而不是與機率幅本身成比率。〕物理學史上，這是第一次物理學家無法指定物體在空間中的具體位置。

對這個理論最無法接受的人可能是薛丁格本人，和普朗克一樣，薛丁格是個保守的古典物理學家，他原本希望藉由波的描述方式可以避免量子跳躍的說法，使得古典物理學中對於原子的看法得以保存。有一次，在和波耳的一連串會談中，薛丁格甚至說，「如果你一定要堅持有量子跳躍的話，我希望我從來沒有研究過原子理論。」

古典物理學V.S.量子物理學

量子物理學和過去物理學的理論截然不同。例如，在牛頓力學中，對任何一個物體（比如說是一個棒球），我們可以精確地計算出它在每一時刻的位置，祇要我們知道這個物體在運動過程中受力的情況。我們可以描繪出這個物體飛行的軌跡。在量子物理中則不然，機率與可能性操縱一切，當一個人說電子在某處的時候，等於同時在說，還存在些微的可能性，使得電子可能位於他處。

如果電子的存在與機率有關，那麼電子存在的空間將會瀰漫整個空間。物理學家習慣以「電子雲」（electron cloud）形容電子包圍原子核的方式。在量子力學中已經沒有軌道的概念，取而代之的是「機率雲」（probability cloud）。用物理學的行話來說，電子組態稱為「量子狀態」（quantum state）。當電子進行量子跳躍時，電子並不是從一個軌道跳到另外一個軌道，而是在兩個「狀態」中躍遷。因為不同的「狀態」含有不同的能量，量子躍遷仍然會產生輻射。

人類語言是從描述巨觀世界（即日常所見的世界）的現象演化出來的。這一套語言如果用來描繪次原子世界時，就顯得窘態畢露。然而，我

們可以說，電子在無限多個地點同時被「看」到。這是因為機率波環繞著原子核周圍的空間存在，其中包含無限多個點。

這是另外一個「良性的」無限大的例子，不同於我們實際上所遭遇到無限大的數值，如無限大的能量等。如同地球環繞太陽一樣，電子可以有無限多個位置，唯一的差別在於電子同時佔據這些位置，而地球一次祇能在一個地方。

量子力學中到處充滿著機率，電子雲祇是一個例子。理論中並沒有說明一個電子何時會從一個狀態躍遷到另一個狀態。理論祇告訴我們躍遷的機率有多大。更有甚者，電子存在於這個或那個狀態也是一種機率。事實上，次原子粒子通常由多個狀態混合在一起組成的。電子不但可以同時出現在許多地方，也可以有許多不同的狀態。

你也許以為，這種充滿機率的理論，不可能用來計算任何問題，事實並非如此。量子力學不祇有新觀念，而且也是威力十足的計算工具。量子力學的確無法告訴我們單一粒子的行為，因為物體包含極其眾多的粒子。舉個例子來說，一立方公分的水中包含約有十的二十三次方個粒子。當我們計算量子機率的平均值時，可以得到相當準確的預測值，也可以算出一些確定的物理量，諸如能量、波長等。量子力學經過物理學家一再驗證，

都能得到精確度極高的結果，量子力學已經被證實是一個正確的理論。

《校訂者註》：

原書此處的描述並不正確。量子力學的機率性質，並非來自於眾多（十的二十三次方那麼多個）粒子所產生的統計性機率。量子力學的機率性質，來自於次原子這種微觀世界的本質。即使我們研究的對象祇是單一的一個電子或原子，仍然呈現機率的性質。

第六章

電子質量無限大

ELECTRONS HAVE INFINITE MASS

量子力學幾乎可以用來解釋任何事物，不但可以用來解釋原子結構，也可以用來說明原子如何組成分子，也因為如此，量子力學成為物理學及化學中的核心理論。物質的性質取決於構成物質的原子與分子彼此間如何交互作用。不論是鋼鐵的強度、瓦斯的燃燒、彈簧的彈性、鉛筆心的柔軟，乃至電腦晶片內電路運轉的過程等，各種日常生活經歷的物理現象，最終都可從量子力學的理論得到解釋。量子力學是研究次原子粒子行為的基礎，也被用來建立解釋宇宙起源的理論，量子力學唯一無法解釋的基本現象就是重力。

然而，在量子力學成為所有理論的基礎之前，還有兩個鴻溝必須彌補。首先，海森堡與薛丁格在一九二五之後的兩年間發展出來量子力學，無法解釋電磁輻射與物質間的互動關係，此外，也和愛因斯坦的狹義相對論有所衝突。根據量子力學，電子從一個狀態跳到另外一個狀態時，將會放出或吸收光子（現代用語稱做光量子），然而，量子力學並未說明光子的輻射或吸收是如何發生。

物理學家在一九二〇年代後期遭遇到這兩個問題，兩者之間顯然有關連。如果科學家試圖對光子與物質間的相互作用關係解釋得精確一點，就必須將量子力學與相對論相結合。相對論處理的對象是以接近光速運動的

物體，光子與原子相互作用時也會出現相對論效應。例如，當光線遇到鏡子而反射時，光子以光速前進遇到鏡子之後，馬上以光速反向運動，此時一定有些事情發生在鏡子原子的電子上，電子要先捕捉光子，然後馬上朝反方向釋放光子。量子力學的原始理論並未論及此處，也沒有說明光子是被反射，還是被吸收後再釋放，甚至也沒有人知道電子是不是可以同時進行這兩件事。

都是丹特小姐惹的禍

解決這兩個問題的是二十世紀最偉大的物理學家之一的英國物理學家狄拉克（P. A. M. Dirac 1920–1984）。其實一開始時，要不是一連串偶然事件的組合，狄拉克也不會成為物理學家。在年輕時，他想成為數學家，但是當他進入英國布理斯托大學(Bristol University）時，決定攻讀電子工程，所以當他在一九二一年畢業時，便試圖找電子工程師的工作，但是當時英國經濟不振，一直找不到工作，狄拉克祇好再回到母校進行博士後研究的工作，這次就回歸到數學的領域。在研究所的前兩年，他被迫要選擇繼續從事理論數學或是進入應用數學的領域。當時在布大祇有另外一位同樣研究同樣領域，叫做丹特小姐（Miss Dent），她已經決定要往應

用數學的領域發展，狄拉克自己不在乎往那個方向發展，於是決定也跟丹特小姐一樣選擇應用數學，他不希望老師祇為兩個學生必須開兩套不同的課。

當時的英國大學中，普遍將理論物理學視為應用數學的一部份，多數的大學的物理系也祇有實驗物理教員。理論物理學家則被安排在數學系中，這個傳統仍舊持續到現在，例如霍金（Stephen Hawking 1942-，時間簡史的作者）就在劍橋大學數學系擔任盧卡斯講座教授，而不是物理系。附帶一句，這個盧卡斯講座教授，牛頓以及狄拉克也出任過。

狄拉克在一九二六年在劍橋大學獲得博士學位。同年底，他便已經對物理學有重要貢獻。他寫了一篇奠定量子場論基礎的論文，討論光與其他輻射對於物質間的相互作用。這個理論並不是由狄拉克獨自發展出來，海森堡、鮑立、德國物理學家喬登（Pascual Jordan）以及其他人都有重要的貢獻。然而，直到一九四七年，美國物理學家費曼(Richard Feynman 1918-1988)、史溫格（Julian Schwinger）及日本科學家朝永振一郎合力解決理論中的難題，這個理論才算完成，他們三人也因此獲得諾貝爾物理獎。

狄拉克瞭解祇有與狹義相對論相結合，量子場論才算成功，但是這

並不容易。薛丁格在一九二六年曾經試著要將相對性加入量子力學中，他失敗了。其他頂尖物理學家也曾想要解決這個問題，但並未成功。看來要將相對論與量子力學結合起來所得到的結果和實驗數據不可能相符合。

結合量子力學與相對論

當理論物理學家試圖創造新理論時，他們先在心中建構心像（mental picture），善於運用心像的科學家則被稱為具備良好的「物理直覺」(physical intuition），下一步則是將心像化為實際的數學模型。在狄拉克研究相對論量子理論時，他完全拋棄這種做法。他先不斷操作數學模型，直到這些數學式看起來能夠以相對論的方式來描述次原子的世界。狄拉克並不是雜亂無章的胡亂嘗試，他能有所發現的原因是因為當具有重要意義的數據出現時，他能分辨出來，然後進一步運用、發展。

由於狄拉克的理論過於數學化及抽象化，以至於無法在本書中詳加介紹。讀者僅需知道當這套理論完成時，它能夠提供電子與原子的物理圖像。我們將發現，這個圖像非常怪異。

狄拉克在一九二八年將他的理論發表出來，雖然，他一開始時僅僅想瞭解光和物質之間的相互作用，他的理論也對海森堡—薛丁格的量子力學

有所改進，足以解釋其他既有理論觀察到的結果，而且往往更精準，還能得到一些以往得不到的結果。然而，亦出現新問題，狄拉克的理論似乎暗示著電子會有「負」的能量狀態，當時人們不清楚如何詮釋這種「負」能量的電子。因為，如果引用愛因斯坦最著名的質能公式 $E = MC^2$（能量等於質量乘以光速的平方）來描述電子時，電子「負」的能量等於電子具有「負」的「質量」，這是完全不可思議的。質量從來都是正的，怎麼可能有「負質量」的東西存在呢？

在數學與物理學中，負數隨處可見，有些情形下，甚至可以直接忽略。例如已知有四平方英吋的面積，試求每一邊長。結果很簡單，邊長為2，以數學計算來說，-2也是一個答案，但是長度不會為負，因此可以直接忽略這些多餘的，或是不合理的解答。

量子力學中不能這樣做，負值的能量狀態不能忽略，因為量子力學允許電子在不同能量狀態下跳躍，更無法阻止電子從正值能量狀態跳到負值能量狀態，如果狄拉克的理論是正確的，則意味著宇宙間所有的電子總有一天會全部都跳到負值能量狀態，事情還未結束，電子還會繼續跳到能量更「負」的狀態。在跳躍的同時也放出輻射線。到最後，電子會位在「負

無限大」的能量狀態，同時，「無限大」的輻射能量被釋放出來。但這是完全不可能的情形，不僅宇宙會因此充滿「無限大」的輻射能量，而且電子就根本不可能處在「正」的能量狀態。易言之，人們根本不可能觀測到電子的存在，因為所有電子都需具備正的總能量。

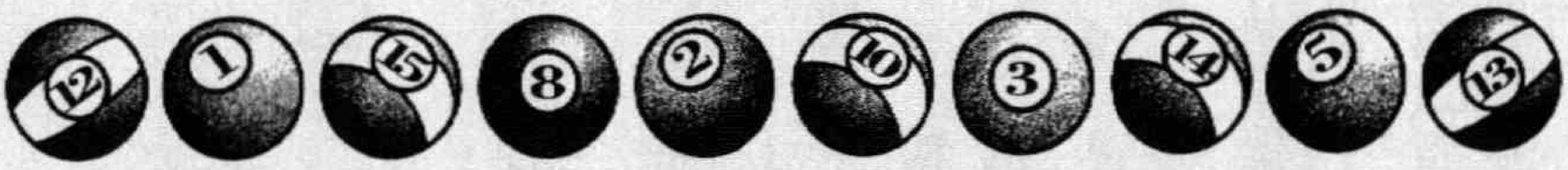
電子海

狄拉克瞭解一定要找出一種方式來解釋何以電子「能夠」帶有正能量。他很快就找到一個看似怪異，但是卻相當有用的解答。他認為存在帶正能量電子的理由是因為無數個負能量的狀態都已經被填滿，換句話說，相對於一個正能量狀態的電子，這世界同時存在無限多個具備負能量的電子汪洋，填滿了所有可能的「負能量」狀態。（註：因此，這個「正能量」電子能夠停留在「正能量」狀態，因為已經沒有「負能量」狀態空在那邊，讓它可以跳過去。）

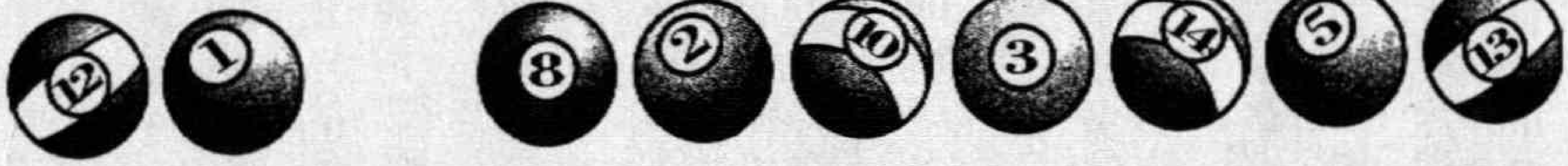
很明顯的，我們無法觀察到帶負能量的電子，但是狄拉克知道，他的理論會產生觀察得到的結果。如果一個帶負能量的電子得到足夠的能量，它就可以進行量子跳躍，躍升到正能量的狀態，科學家就可以觀察到電子突然出現，同時，電子汪洋間就會出現一個空洞，這個空洞則以帶正電粒

子的形式出現。

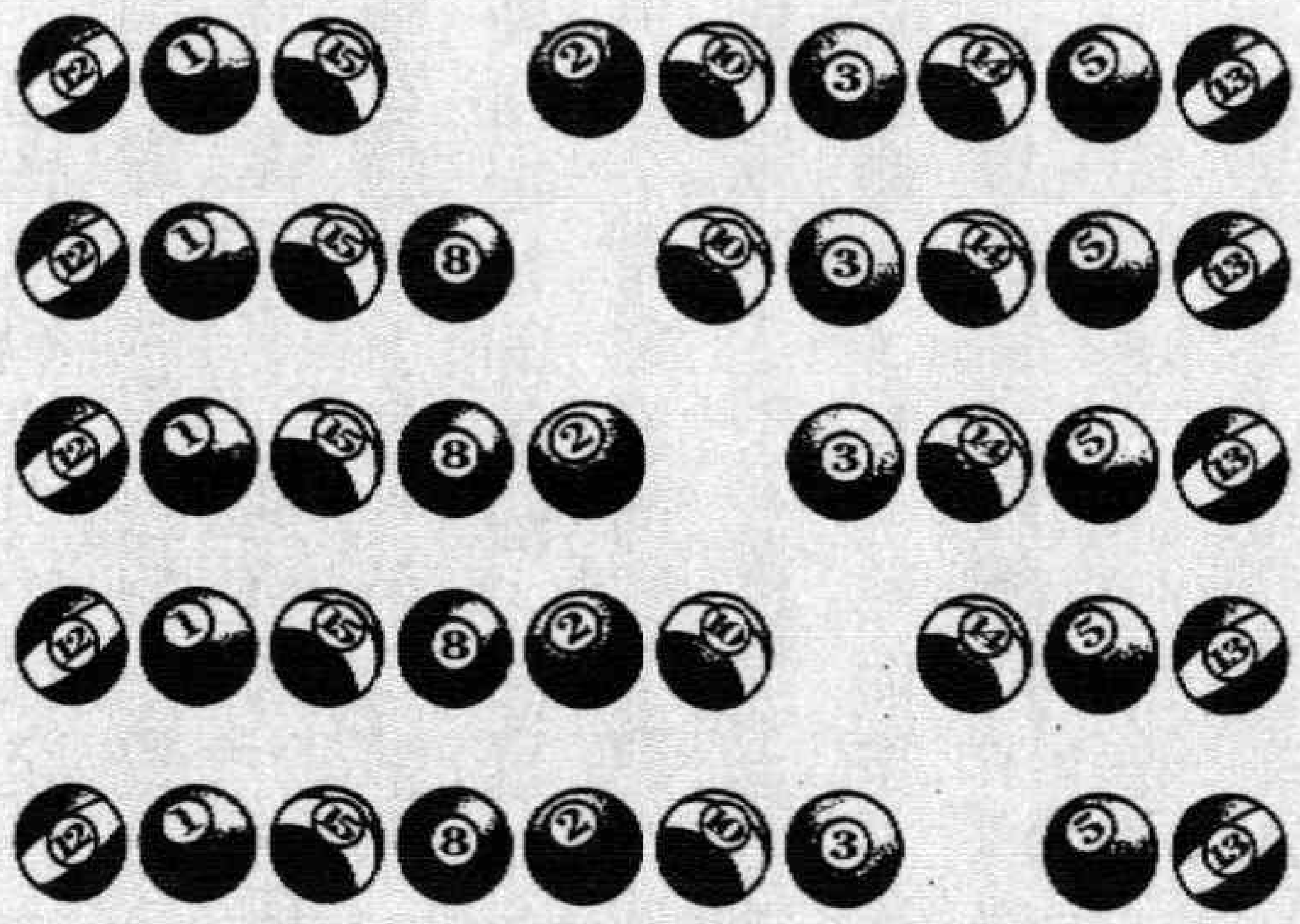
為了清楚呈現狄拉克理論的真正意涵，可以想像撞球排成一列，如上：



然後再取出其中一顆。



然後再想像右邊的球依次移到左邊。



如右圖所見，在球之間的「這個空隙」似乎在向右移動。

狄拉克知道，觀察不到所謂具備負能量的電子汪洋，未必看不到這個「空洞」。如果真有這個「空洞」存在，這個空洞就像一般粒子一樣地運動，甚至，這個「空洞」具備正能量，帶有正電，活像一個正電粒子。因此，能量被電子汪洋吸收之後，將會產生兩個粒子，一個帶正電，一個帶負電。

當時，物理學家祇知道有三種粒子：質子、電子和光子，中子要到一九三二年才被發現。所以一開始，狄拉克猜測這個正能量的「空洞」不是

質子，再進一步思考，他發現這不太合邏輯，因為一個質子的重量比一個電子要重上兩千倍。所以他在一九三一年出版的論文中表示，這個在負能量汪洋裡出現的「空洞」應當是另外一種全新的粒子，與電子同重，但帶正電，而非一般電子所帶的負電。

正子的發現

狄拉克指的正子（positively charged electron），隔年為美國物理學家安德森（Carl Anderson）所發現。安德森研究的主題是宇宙射線（cosmic ray）。宇宙射線來自地球之外，主要由質子所組成的能量粒子流，並不是電磁輻射。安德森利用霧室(cloud chamber)進行研究，當粒子進入雲霧室時，會留下行進軌跡，物理學家可以利用這些軌跡來進行研究。進入雲霧室的粒子會受磁場影響，改變行進方向，物理學家就可以經由研究改變磁場後的軌跡，決定粒子的電性與質量。帶正電的粒子會偏折向一個方向，帶負電的粒子則會偏向另外一邊，較輕的粒子偏折的程度也比重粒子強烈，因為重粒子較為笨重，較不容易受磁場影響。

安德森的實驗發現了有一種與電子等重，但攜帶正電的粒子，其行進軌跡與電子相仿，但方向相反，這種粒子很快地便被命名為「正

子」，正如狄拉克當初所預料。

這是第一次由實驗室證實出理論事前推導得知的粒子，安德森與狄拉克獲得廣大物理界的讚美，安德森更因此獲得諾貝爾獎，但是拉賽福卻相當不悅，他認為應當先由實驗物理研究這些新事物的性質之後，才形成理論。

物理學家普遍認為正子的發現確定了狄拉克的理論，雖然他們對「負能量狀態的電子汪洋」（sea of negative-energy electrons）的概念，還是覺得彆扭，不但是因為這片「電子汪洋」中含有無限多的粒子，也因為這片汪洋中具備無限多的「負能量」。因此，一九三四年美國物理學家歐本海默（Robert Oppenheimer, 1904-1967）以及他的博士後研究員富里（Robert Furry）建議直接以正子、電子來說明，而不要再運用「負能汪洋」的說法，這祇需對狄拉克的數學式做了一點小小的修正即可。

狄拉克的理論相當令人驚訝地呈現了次原子世界中，兩個相當不同的景象。不過，我們以前也碰過類似例子，海森堡與薛丁格對量子力學的說法大相逕庭，但是也說明了同一個現象，得到的數學數據也完全一致。薛丁格的理論基於波的概念，然而，海森堡一點也沒有討論到波。

對於次原子的世界，物理學家很難形成「心像」，因為很難想像次原子世界的現象會在現實巨觀世界中找到完全對應的例子。我們在腦海中可以清楚地浮現瀑布、寵物、暴雨等的景象，因為在我們的日常生活中或多或少都曾見過這些事物，並且留下記憶。但是像電子一樣的微小粒子，既不像我們日常可見的任何事物，行為表現也無法以一般人的經驗法則加以預測，因此有時候同一個物理現象形成許多不同的心像是很有可能的。

如果有兩個心像導至相同的數學結果，那這兩個心像應當是相當的。物理學家可以同時接受「在無限的電子汪洋中的空洞」及「電子與正子」的原因，是因為這兩種說法都可以說明同一件事情。事實上，還有第三種說法可以用來解釋這個現象。如同費曼所展示的，正子在數學上可以等同於逆時前進的電子。這個說法，想想便罷，不必真的相信有什麼粒子會穿越時光隧道，從未來跑回過去。不過，有時這種超乎常識的想像有助於瞭解微小世界。

粒子、反粒子以及虛粒子

根據狄拉克的理論，電子與正子會同時成對出現，在實驗中也屢屢可見。在特定情形下，伽瑪射線將會轉變成一個電子與一個正子，在此情形

下出現的正子持續的時間不會很久，當正子碰到另外一個電子時，會同時毀滅，在兩個粒子碰撞之處，出現另外一次伽瑪射線。利用愛因斯坦的質能互換公式，可以計算出伽瑪射線的能量。

正子被稱為電子的反粒子（antiparticle）。事實上，每種已知的粒子都會有反粒子相對應，例如反質子、反中子以及反夸克。嚴格來說，正子應當被稱做「反電子」（antielectron）。然而，在反粒子的概念出現之前，正子的名字已經確定，無法改變了。

粒子與反粒子可以自純能量之中產生。令人驚奇的是，就算能量不夠，也可能有粒子產生，海森堡測不準定理（Heisenberg's uncertainty priciple）預測了這一點。海森堡測不準定理是量子力學中最重要的基本定理之一，它指出我們無法同時知道粒子的位置與動量，對其中一個量知道得越清楚，則對另外一個量越不確定，這種不確定性並非起因於測量儀器所造成的誤差。在量子力學中，粒子不會有特定的位置與動量，這也是原子周圍的電子會被稱為「電子雲」的原因。

海森堡定理不但可以應用在粒子的位置—動量組合，也可以應用在其他物理的量上，例如能量與時間的組合。例如我們對粒子的能量越清楚，越無法預測粒子在這個能量狀態下會存在多久；反推亦然，如果我們可以

清楚知道粒子在某能量狀態下存在的時間，便無由得知這個粒子當時的能量。

這種例子可以繼續推導下去，如果我們量得的時間很短，能量的不確定性會大到足以產生粒子與反粒子。這些虛粒子從虛無中誕生，在瞬間中又歸回虛無，存在的時間不超過億兆分之一秒。這並不祇是理論上的憑空想像，而是實際存在的現象。雖然這種朝生夕死的虛粒子無法實際觀察得到，但是這些粒子的誕生與消逝都會留下痕跡，物理學家已經進行過許多相關的實驗，並證明了虛粒子的存在。

無限小的電子有無限大的質量

電子會吸收或放射出光子，而任何試圖描述光與物質間互動關係的理論也僅須處理三種粒子：電子、正子與光子。量子場論所處理的便是量子電動力學（Quantum electrodynamics）簡稱QED理論。雖然QED理論的名字看起來相當的嚇人，其實基本觀念相當簡單：在光子與電子間彼此互動的環境下，各種虛粒子會持續不斷創生與消逝。

在進一步描述虛粒子的誕生之前，先回顧一下電子的基本性質。在電子被發現後的數年間，電子這種粒子被認為是微小的球體。物理學家

試圖根據各式各樣的理論，計算出電子的尺寸。然而，他們都失敗了，最後不得不同意電子應當被視為不佔空間、沒有維度的質點。

根據愛因斯坦的相對論，沒有任何物體的行進速度會比光速快。甚至，物理作用或訊號的速度也不會比光速快。這是物理界公認的鐵律。電子也好，其他粒子也好，都遵循這個定律。試著想像電子與其他粒子進行碰撞，如果電子具備體積，碰撞所產生的力將以不超過光速的速度傳遞至整個電子，因此，電子在某一瞬間將會因而變形。

在巨觀世界中，事情正是如此發生的。舉例來說，撞球相碰撞時，兩邊都會有輕微變形的情形出現，然後馬上回復原狀，這在概念上沒有問題。事實上，這有助於瞭解球體碰撞時所發生的事情。但是，當電子碰撞時，事情全然並非如此。如果電子也會變形，必然也有可能在極高能量的碰撞下碎裂成片，但是這是不可能的事情，當時所有的實驗結果都說明電子是基本粒子。從另外一個角度來看，能夠變形之後又恢復原狀的物體必然存在內力，才能產生這樣的彈性，但是沒有任何證據顯示電子之中也有這樣的力。

認為電子是質點的概念已經由實驗「大致」證實。我之所以用「大致」來形容，是因為要進行確定電子所佔空間為零的實驗，其精確度要達

到無限大。但是目前最精密的實驗已經確定電子的半徑低於十億分之一公分。另外一個形容電子尺寸的表示方式是和質子比較，電子比質子的半徑要小上十萬倍。體積就是質子的一千萬億分之一倍以下。由於這些極小的數值已經超出觀測儀器的極限，因此已經可以「大致」確定電子是不佔空間的質點。

如果電子真的不佔空間，則必然具備無限大的質量。為了要瞭解這一點，先試想有兩個質點：如果兩者電性一樣，將會產生遵循反平方律的排斥力，兩者間的排斥力與距離成平方反比，兩者距離越近，排斥力將急速增加。當兩者沒有距離時，排斥力將達到無窮大，而為了達到這一點，必須自外界加入無限大的能量。

同樣的情形發生在電子上，假設電子原本具備體積，然後縮小到祇剩下數學上的一個點，而且進一步假設電子是由許多個更小的電荷所組成，當電子縮小成質點時，要將這些微小電荷壓縮在一起，一樣必須加入無限大的能量。

然而，又如愛因斯坦所說的，質能可以互變，因此電子必然具備無限大的質量。當然，沒有人會相信這是真的。但是，在當時世上最權威的理論卻這樣說，除非有更好、更新的理論，否則人們無法避免把電子看做具

有無限大的能量，同時本身卻是無限小到祇是一個幾何意義上的點。

虛粒子

根據QED理論，我們不可能直接看到這些具備無限大質量的電子，而是看到由一大群虛粒子環繞著表面的電子。虛粒子存在的時間不會太久，但是新的虛粒子持續出現，取代了這些虛粒子的原有位置，因此電子總是被虛粒子所組成的「雲層」所包圍。這些虛粒子組成的雲層具備電性，因此會被極化，帶正電的虛粒子會被拉向靠近電子，而帶負電的虛粒子則被電子排斥，於是越來越多帶正電的虛粒子在電子附近，越來越多帶負電的虛粒子在離電子較遠的地方。這層由「極化的雲」（polaried cloud）所組成的「屏蔽」（shielding）讓物理學家觀察不到電子無限大的質量或電量，因此在實驗室中觀察到的質量或電量都是有限的數值。沒錯，QED理論就是說電子具備無限大的「裸」電荷，而環繞電子表面的虛粒子則有無限多個。

如果要頒獎表揚物理學家曾接受過最瘋狂的物理理論，QED理論當之無愧。事實上，當物理學家首次試著將QED理論應用在計算上，多半會得到一些相當瘋狂的結果。由於這套理論相當複雜，而且有許多無法得

到精確答案的數學式，因此物理學家祇好走上老路子，恪遵「一步一腳印」的古老傳統。首先，物理學家先找出大致上正確的結果，然後再用這些結果追尋下一個更接近真實的數據，就這樣越來越接近真相。一般來說，這個方法相當不錯，物理學家做的越多，結果越正確。

但是在QED理論上，這個死功夫就沒有用武之地了。物理學家發現祇在第一次嘗試時，會得到大致正確的結果。但當他們想要向前邁進，繼續追求更精確的結果時，他們會發現完全「揁龜」，因為無限大的夢魘在前面等待著。這是件令人捶心肝的事，因為得到初步正確的值，表示這個理論有正確之處，但是出現無限大，又直指理論必定有錯。

在一九三〇年代，物理學家利用QED理論推導出相當多重要的結論，這意味著如果物理學家願意接受「大致」正確的結果，QED理論可以應用來解釋發生在次原子世界中的許多現象。

然而，很少物理學家能改進QED理論，以讓結果更精確。因為，為了達到這個目的，物理學家必須擺脫「無限大」的糾纏，但是沒有人知道怎麼做。

重正則化（renormalization）

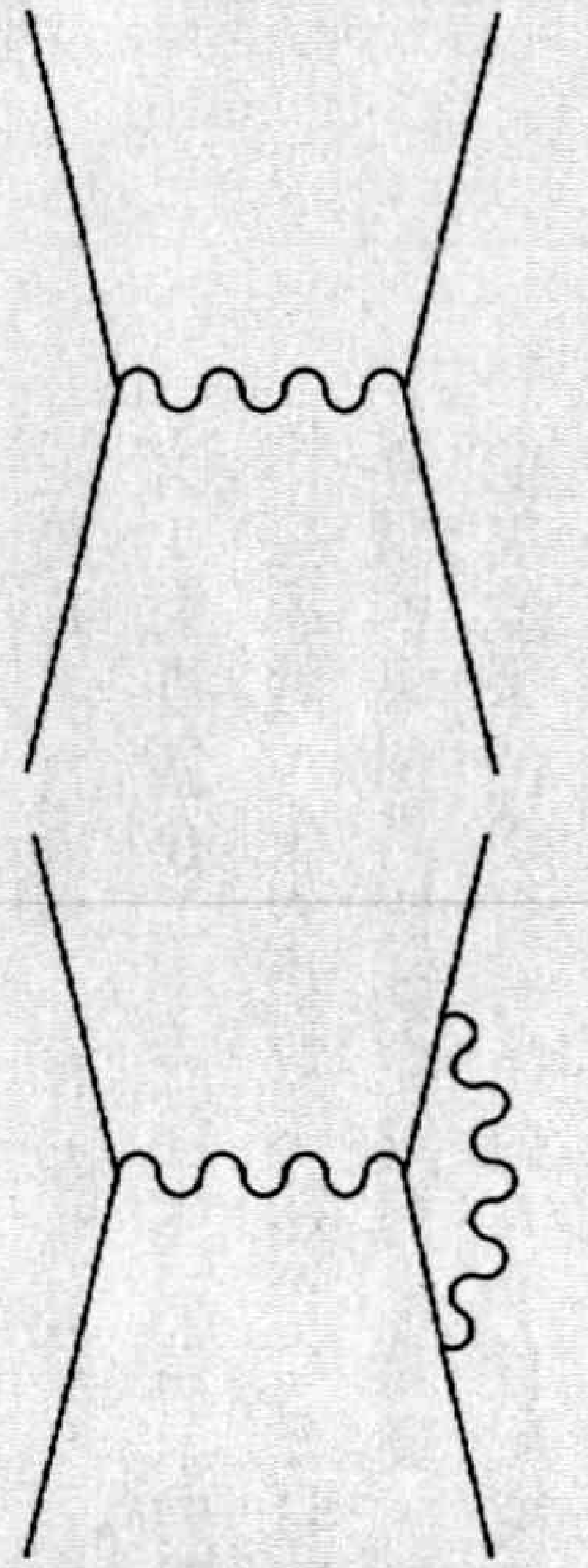
知名物理學家大多在二十歲左右就嶄露頭角：牛頓在二十五歲前，發現萬有引力定律；愛因斯坦在二十六歲前，出版第一份關於相對論的論文；海森堡在二十三歲完成量子力學；史溫格更早熟，他十四歲進入紐約市立學院，十六歲寫下關於QED理論的第一份論文，但並未出版。他在畢業的那個暑假就完成博士論文，但是卻沒有馬上獲得博士頭銜，因為在他攻讀學位的哥倫比亞大學有在校年資的限制，而且傳統上也不會馬上授予博士頭銜給剛取得學士學位的學生，所以史溫格直到二十一歲才拿到博士學位。即便如此，史溫格的物理事業仍然開展得相當順利，在三十歲之前就已經獲聘為哈佛大學的專任教授。

史溫格這麼年輕就致力於QED的研究，因此，解決QED惱人的「無限大」問題，自然非他莫屬。他解決的技巧稱為「重正則化」理論（renormalization）。所謂重正則化理論，簡單地說，就是把那些討厭的「無限大」兩兩相減掉，於是剩下來的祇是有限的數量。

有些物理學概念說來簡單，轉變成數學式子時，卻複雜難解。舉個例子來看，愛因斯坦在廣義相對論中提及的曲線空間，說來輕鬆，但是要用來求解特定問題時，就會變得極其複雜。實際上，有時根本找不到解答。同樣的，重正則化理論牽涉到相當複雜的數學技巧，光是為了去除QED

理論中的無限大，就困擾了一整個世代的物理學家。

史溫格於一九四八年在紐約庇蔭島（Shelter Island）一場研討會中，提出他對於重正則化理論的見解。當他發表時，他發現他並不是唯一一個發現去除QED理論中無限大的科學家。緊接在他的演講之後，費曼也展示了他的作法，這兩場演講大不相同。史溫格用的是物理學家普遍能夠運用自如的數學語言，因為史溫格知道他無須深入講解細節，物理學家也能夠自行處理重正則化；費曼則從全然不同的角度出發，他製作了一些簡單的圖形，用他發明的數學語言來解釋他的概念。物理學家坐在位置上聽費曼講解，臉上露出狐疑的表情。在台下聽講的波耳甚至舉手質疑費曼對量子力學基本定理不夠瞭解。



兩個簡單的費曼圖。
上圖中，兩個電子向上運動，彼此靠近，其中一個電子放射出光子，並由另一個電子所吸收，其中的波狀線段代表光子。下圖中的情形也是一樣，但是，其中一個電子放出第二個光子，然後又馬上吸收回去。由於會發生許多不同的交互作用，費曼圖會變得很複雜。

會議結束之後，費曼和史溫格交換心得時，發現對於對方的方法都不太能理解，然而用來計算時，卻能夠得到同樣的數據。也許兩人的數學方法截然不同，但是卻建築在同樣的物理基礎上。

一九四九年的英裔美籍物理學家戴森（Freeman Dyson）證明了史溫格和費曼的解法完全一致，因此兩人與獨立做出史溫格解法的日本科學家朝永振一郎（Shin'ichiro Tomonaga）同時分享發現重正則化的榮耀。現代科學家在處理QED理論時，多半使用費曼的方法，因為比較不那麼複雜，而且費曼提出的圖形（現已被稱為「費曼圖」）為物理學家提供了一個直覺式的思考方向。

QED理論是一個高度數學化的理論，而重正則化法也是特別設計用來解決例如無限大等數學問題的工具，其中當然可以探索出一些物理上的涵義。QED理論認為電子具備無限大的質量與電量，而外圍則環繞著一層由虛粒子構成的「雲層」，重正則化法就是計算這層虛粒子雲，以消除「無限大」的夢魘。

可怖的聒噪聲

重正則化法稱得上是個合理的數學工具嗎？狄拉克並不這樣想。他認

為這是一個繞過數學基本問題的小技巧，而且直到死前都還不斷批評這種數學方法。「這不是數學，」他批評道，「真正的數學至多衹把極微小的數值略去，而不是像這樣直接把自己無法處理的無限大給去掉。」即便是費曼也承認自己部分同意狄拉克的看法，他認為這是個「愣頭愣腦的數學方法，靠著魔術般的手法得到解答，但是這卻讓我們越加無法證明量子電力學在數學上是不矛盾的理論，我甚至覺得重正則化法不合乎數學基本邏輯。」

哈佛大學物理教授喬吉（Howannd Georgi）用非常生動的比喻來形容QED理論以及重正則化。他說，QED理論正像是一輛老車，「充滿可怖的聒噪聲，才跑沒幾分鐘，引擎開始冒煙，整輛車裡充滿可怕的味道，然後，乾脆不動。」然後他認為，當QED被重正則化法修正後，就像「踢了引擎一腳，猛捶儀表板之後，聲音不見了，車子也運作得順暢極了。」

正如喬吉暗示的，重正則化法讓QED理論變得更成功，預期實驗結果可以比以前要好上千億倍。甚至，除了解釋光與物質的互動之外，也可以解釋電力與磁力的本質。根據QED理論，帶電粒子之間的互動關係就是交換光子，一個粒子放出光子，其他粒子則加以吸收。這種光子交換的

行為可以用來解釋粒子間的引力或斥力。正是經由交換光子，電子會互斥；也是靠交換光子，電子與質子會相吸。

這可以類比成兩個球員之間的投擲練習。假設兩個球員彼此相對投球，球投出的瞬間，球員會因為相對運動而後退一些，球進入另一球員的手中時，另一球員會因為球的慣性，也稍稍退後。就這樣面對面地傳球會使得兩個球員之間距離越來越遠，這正像是帶有相同電性的粒子會排斥的原因。試想另一種狀況，兩個球員背對而立投擲回力棒，第一位球員投出回力棒時，會後退一些，也靠近他的夥伴一些，當回力棒在空中繞了一個大圈，進入第二位球員的手中時，也會因為慣性而稍稍後退，這意味著兩人距離越來越近，這就是電子與質子相吸引的狀況。這兩個類比其實都有點牽強，但是多少能夠說明引力與斥力的起因。

強力與弱力

這個理論的成功還不僅於此。其他重正則化的量子場論也應用得相當成功。舉個例子來看，像是量子色動力學（Quantum chromodynamics，QCD）就用來解釋中子、質子等粒子的結構，以及將粒子拘束在原子核中的力。

質子與中子都是由夸克所構成，質子由兩個上夸克（up quark）與一個下夸克（down quark）組成，而中子則是一個上夸克與兩個下夸克組成，這裡所謂的「上」、「下」不能從字面來賦予任何意義，真正的作用祇不過是用來辨識用。夸克共有六種，除了上、下夸克之外，還有奇夸克（strange quark）、魅夸克（charm quark）、頂夸克（top quark）、底夸克（bottom quark）四種夸克，但是這四種夸克並不用於構成一般的物質，由他們組成的粒子，祇存在於實驗室中製造出來的特殊粒子。

夸克攜帶某種「荷」（charge），有如電子或質子的「電荷」（electrical charge），但兩者仍有明顯的差異。夸克所攜帶的電荷有三種，而不是一般「電荷」祇有正、負兩種。這三種被稱為紅、綠、藍，以光的三主色為名，並非意味這些電荷具有顏色，這些電荷比色光波長的尺寸還小，如果你願意，也可以叫他呼紅、送紫、迎朱，祇要物理界能夠接受，反正這些「荷」不會因為名字的改變而有所影響。

正如同正負電荷以交換光子的方式彼此吸引。夸克可以聚結在一起的原因是因為彼此交換膠子（Gluon），這些膠子所產生的力叫做強力（strong force），可以將質子與中子拘束在原子核之中。強力真的很強，可以輕易地克服同電性電荷（質子）間的斥力。但是，強力會隨著距

離而急遽減少，在原子核之外的區域會減低至零，這正是強力祇能存在於原子核內部的原因。

在自然界中有四種基本作用力：強力、弱力(weak force)、電磁力（electromagnetic force）與重力。弱力也僅存在於原子核內部，僅與某些特定核反應有關，比如說貝塔衰變（bata decay）（這種衰變是因為電子自原子核中放射出來）。不像強力與電磁力，弱力無法被重正則化。然而，一種統一了電磁力與弱力的量子場論卻可以重正則化。這種「電弱力」（electroweak force）理論預測了新粒子必然存在，並將其命名為W與Z粒子，這兩個粒子在一九八三年被發現。

重力無法被重正則化，所以我們祇得做出結論認為，QED理論以及其他相似理論可以解釋任何自然現象，唯獨重力例外。不過，這個理論還是有缺點。舉例來說，QED理論並未解答電子應有的質量與電荷，電子的質量或電荷量，無法從理論中推導出來，祇能從觀測到的數字「硬塞入」理論中。物理學家也希望他們所使用的這些基本理論是彼此一致的。但正如費曼所批評的，這也許是永遠做不到的，說得更清楚些，把無限大相減而取消它並將它忽略，本來就不是合法的數字運算。

一切之解

物理學家一直想找出一個可以用來解釋所有自然力的理論，換句話說，他們想找出一個類似電弱力理論，但同時能解釋所有四種力的理論，而不像電弱力理論祇能解釋電磁力與弱力。這種理論可能是極美的；能夠把每件事用一個簡潔優美的理論連結在一起總是一樁令人賞心悅目的快事。更甚者，這個理論很可能會預測新的事物，有如當電磁力與弱力統一起來時，新出現的W粒子或Z粒子一樣。最後，科學家猜測這樣一個統一四種基本作用力的理論如果被找到的話，也能同時導出各種基本粒子的質量。例如，人們總想知道，質子的質量為什麼是電子質量的一千八百三十六倍？

建構統一理論的企圖並非十分成功。科學家構想過許多試圖建立統一電磁力、弱力、強力等三種自然力的理論，但這麼多被稱為「大統一」(grand unified theory，縮寫成GUT)的理論，哪一個較正確，沒有人知道。至於包括第四種力——重力，那就更別談了。其中最主要的原因是因為重力比其他的三種力都複雜得太多。根據愛因斯坦的廣義相對論，重力場本身會產生額外的重力，或者說，重力本身也有重量。重力的行為

太過複雜，以至於沒有人找到過可以將重力重正則化的理論。

然而也有其他研究取向可能可以讓物理學家找到結合四種力的方法，同時又可以取消令人不太放心的重正則化手續，這樣的理論稱做「超弦理論」（superstring theory）。

卡魯沙—克萊恩理論

一九一九年，波蘭物理學家卡魯沙（Theodor Kaluza）從愛因斯坦的廣義相對論出發，試圖結合重力與電磁力，他將研究所得的論文寄給愛因斯坦，希望可以得到愛因斯坦的贊同。愛因斯坦相當欣賞其中的某些想法，但是他建議卡魯沙在將理論公諸於世前，再對理論多下些功夫。由於當時要投稿到知名科學刊物，必須有知名科學家背書，因此卡魯沙的理論遲了兩年才發表。

一九二一年德國數學家威爾（Hermann Weyl）提出另外一套理論，試圖結合重力與電磁力。但是愛因斯坦似乎並不贊同這種方式，他寫給卡魯沙的信中說道，「你的理論比威爾的要好得多。」因此他在卡魯沙的論文上背書。

卡魯沙的理論牽涉到五個維度，他假設有四個空間維度以及一個時間

維度。多出來的一個空間維度讓他可以直接將重力與電磁力視為共同基本力的兩個不同層面，這個理論有很多缺點。舉例來說，這個理論無法涵蓋量子現象，而且無法解釋為什麼觀察不到這個額外的空間維度。

瑞典物理學家克萊恩（Oscar Klein）在一九二六年補強了卡魯沙理論中的部分缺陷。克萊恩重新理解卡魯沙的理論，提出適於量子力學的另一版本，而且解釋了何以另一空間維度無法觀察得知。這是因為這個維度的尺寸極小，10^{-32}公分，小於一個原子核直徑的10^{20}倍。

要瞭解克萊恩的說法，可以試著想像將兩張二維的紙捲進一條管子中，然後再將這條管子旋緊，直到接近直線（僅佔一個維度），使得管徑盡可能縮小，在這個情形下，管子會變成長條桿狀，而原來的二維紙張所佔的其中一個維度幾乎完全消失。

在克萊恩的理論中，整個宇宙繞著四個空間維度之一形成周長約10^{-32}的迴旋狀，而另外三個維度仍然正常。如果有任何物體可以沿著這個緊密的維度行進，祇要一段極短的距離（甚至小於原子核的直徑），就可以環繞宇宙一圈。由於這個維度（如果存在的話）如此之小，當然觀察不到。在克萊恩的時代，我們無法觀察到這麼小的尺寸，到了現在，情形依然。現在最強力的加速器可以探究到10^{-17}公分左右的物質，克萊恩指出的尺寸

還小於這個數字的10^{15}倍。當克萊恩公布這個發現之後，愛因斯坦和鮑立都立刻再繼續研究，但是不久後便都放棄了，同時卡魯沙—克萊恩理論也漸漸被遺忘，直到半個世紀後，研究超弦理論的科學家又開始研究額外的空間維度。

超弦理論

如果要統一電磁力與重力，必須用到五個時間-空間維度，那麼要將四個力統一起來必須用到更多維度的說法應該是合理的。實際上，現今的超弦理論的確多引用了幾個維度。超弦理論引用了十個維度，其中有九個空間維度，及一個時間維度，其中有六個維度的尺寸小於10^{-33}公分。

在超弦理論中，粒子並非是質點，而是不斷振動的細小圓環，或者稱做「超弦」（superstring），尺寸差不多相等於緊密空間維度的10^{-33}公分。由於這些粒子並非質點，因此有希望成功發展出超弦理論，其中不會有「無限大」的夢魘以及重正則化之必要。

但是這還是一個巨大的「假如」，超弦理論已經被形容成二十一世紀物理學，卻意外地在二十世紀出現，其中引用了極其繁複的數學。除此之外，超弦理論並非祇有一套，而是有許多不同的可能版本。目前為止，已

經有五套超弦理論，每一套超弦理論都有數以千計而各自不同的可能解法，之所以這樣千端難解的原因是由於每個新增的空間維度都衹能以特定的一種方式捲曲，但是六個維度就會有數不盡的組合。

超弦理論也在發展中。然而科學界也一致認為，還要再經過數十年才可能找到確切描述次原子世界的理論。而就算真的找到這個理論，也不可能操作實驗來證明超弦的存在，因為就算有一個像星系一樣大的粒子加速器都不可能探索到這個尺寸。從另外一個角度來看，超弦理論是最可能解決在量子場論中必然遭遇的無限大的理論，而同時又能統一自然界四個基本作用力的理論。

是萬有理論，或僅是一條小暗巷？

物理學家之間並未就超弦理論是否成功達成共識。有些人將超弦理論的發現與一九二五年發現量子力學相比較；其他人則認為超弦理論不過是另一次徒勞無功的嘗試。費曼就直稱超弦理論是個「莫名其妙」的理論，霍金也有同感，在兩邊陣營中都可以找到科學界的名流。有人批評超弦理論，也有人認為超弦理論是物理學中唯一有趣的事物，並且信心滿滿地認為從超弦理論中最終可以發現解釋一切現象的理論。

當物理學家論及「解釋一切事物的理論」時，他們指的是可以同時解釋四個自然力的理論，因為當物理學家瞭解這些最基本的自然力，其他自然界的規律都可以從這個理論中推導出來。

從另外一個角度來看，有些物理學家認為不可能有這種可以解釋一切的理論，因為自然是無窮盡的，物理學家能做的祇不過是不斷趨近真相，過去如此，未來也不會有盡頭。

最新實況報導

在這本書寫就之時，美國伊利諾州的費米國家加速器實驗室（Fermi National Accelerator），認為在夸克之下還可能有更小的粒子，他們進行了一連串將高能的質子與反質子正面碰撞的實驗，在這些碰撞實驗中，質子與反質子中的組成粒子會彼此作用，因而可以研究夸克中的力。

在這個實驗背後的想法與二十世紀初拉賽福想要找出原子結構的想法類似，唯一的差別在於，現在用來對撞的粒子能量比起拉賽福撞擊金箔所用的阿爾發粒子的能量要強上十萬倍，因此可以探究到更小的尺寸。

這個實驗也發現，如果研究的物質尺寸大約比質子的尺寸小上一百倍到一千倍時，現有理論都可以解釋。如果尺寸更小，觀察值可能就會和理

論值越差越遠。一種可能的詮釋是夸克是由更小的粒子所組成，而這些次夸克的粒子會彼此作用。

目前為止，還不知道這些想法會不會被證實，或這個發現有什麼涵義。要得到明確的結論，恐怕還早。在此之前，還需要很多時間來處理這些由現代粒子加速器所生產出來的大量相關數據。舉例來說，在一九九二、三年得出來的實驗數據，直到一九九六年初，才發現其中暗示著夸克中還可能含有更小的粒子。

目前對於次夸克粒子仍僅止於揣測，更不清楚其可能涵義。所以我們衹能檢驗一下幾個可能性：

一、無法證實：如此一來，這些自以為發現新粒子的物理學家終究發現自己白忙一場，事實上，過去也有幾宗曾以為發現新粒子的報導，後來都證明是錯誤的例子。就本例來說，並未發現新粒子，衹是找到一些可能的跡象。

二、夸克之下還有更微小的粒子：這意味著這些新發現的粒子也還不是基本粒子，在這些粒子之下，還會有更小的粒子。此一情形下，可能可以推至無限多層，每一層都由另一層更小的粒子所組成，這就像是一個有無限多層的大洋蔥，一層剝完還有一層。但

是如果夸克還不是最小的基本粒子，我們有可能永遠也不知道真正的基本粒子是什麼樣子，越想向下探究，就需要更多的能量，總有一天會到極限，目前我們已經接近這個極限。

三、目前已經發現兩族的粒子，一種是夸克，另一種是輕粒子（Lepton），每一族中都有六個成員，電子屬於輕子的一員，如果夸克是由更小的基本粒子所組成，就很有理由懷疑輕子也不是基本粒子。如果電子也像質子、中子一樣，是由更小的基本粒子所組成，而且具有體積，這些粒子將會在更小的空間裡彼此相互作用，而對於輕子的瞭解將會有助於去除ＱＥＤ理論中的無限大。

四、對於超弦理論來說，這些已經出現的數據還看不出會有什麼影響，有可能到頭來一舉擊垮超弦理論，或者反過來支持超弦理論可以解釋夸克的行為。但是有一件事是可以確定的：這假設的次夸克組成微粒子幾乎不會是超弦，超弦太小了，無法觀察到。

第七章

有個少女叫明晃

THERE WAS A YOUNG LADY NAMED BRIGHT

有個少女叫明晃，
動如脫兔迅於光。
她於今晨飄然離去，
（相對論說）
將會在昨晚回莊。

這些句子相當有名，最早出現在英國的科學雜誌《撞擊》（*Punch*），用以說明當時剛開始為大眾認識的相對論。這些句子相當傳神地說明了愛因斯坦狹義相對論中的某些觀點。愛因斯坦的狹義相對論指出，無論是物質還是訊號，祇要能比光速還快，就能可以穿過時光回到過去。

正如同物理學中其他許多令人驚訝的結論，這種宣稱祇要比光速快，就可以進行時間旅行的概念，也可以由幾個簡單的假設推導出來。狹義相對論基於兩個假設：一、光速恆定，二、對任何勻速運動（uniform motion）中的觀察者來說，所有物理規律形式不變。這裡所謂的「勻速」意謂「向固定方向以一定的速率前進」。「勻速運動」與「不勻速運動」的差別很大，舉個例子來說，在一架以定速前進的飛機中，乘客感覺到和在

平地上一樣的地心引力，無論進行任何行動，都和平常無異，這是「勻速」的狀況，但是當飛機遇到亂流時，向下急降時，狀況又有所差異，這時原先放在盤上的食物可能會變成向上運動，感受到的引力又大不相同。

相對性的概念其實並不是件新事情，伽利略和牛頓早就知道運動是相對的，他們早就知道當船航行過海時，船上的乘客常會覺得船是靜止的。正如伽利略所指出的，如果有東西自高處落下掉在甲板上，乘客將會看到垂直降落的過程，無論船當時是否正在航行，而唯一有影響的是物體相對於船的運動。

事實上，我們都是天生的相對論者，安穩坐在椅子上的人會覺得他是「靜止」的，即便地球正在急急忙忙地自轉著，同時又繞著太陽公轉，而太陽系更環繞著銀河系中心運行，銀河系又繞著太空中其他星系運轉，我們還是覺得自己靜止不動。前面這些圓周運動都不是「勻速運動」，因為都不是沿直線前進，祇是對日常生活來說，已經幾乎等於是勻速運動。

電動力學的問題

當愛因斯坦在本世紀初開始思考相對論的問題時，他發現對這個相對性原則，卻顯然有個例外。他發現電力與磁力，或者電動力學的定律並不

符合相對性的原則。例如當磁鐵移動時，會產生電場，而這個電場將在導體（如一般電線）中產生電流，這就是電力公司發電的基本原理，電廠就是利用快速轉動的磁鐵來創造電力。

從另一個角度思考，設想磁鐵不動，但是導體線圈移動，同樣也會產生電流，然而在此情形下，電動力學解釋這個現象的方式卻完全不同。電動力學仍然預測到電流的產生，但是卻沒有電場，因為磁鐵並未移動。

在愛因斯坦的時代，物理學家都知道其中必有蹊蹺。同樣一個物理現象，僅僅是考慮的角度不同（一者假設導體線圈不動，磁場動；另一者假設磁場不動，導體線圈動。）其結果竟然是一者有電場，一者沒有。如果兩者的差別祇在於相互之間存在「勻速」運動，為什麼兩者的物理定律描述得如此不同？每個人都知道這件事，但是卻沒有人提出說明。這件事就被棄置一旁，彷彿不存在一樣。為愛因斯坦撰寫傳記的作家克拉克（Ronald w. Clark）這樣寫道，「提起這件事彷彿就像褻瀆聖地一樣，沒有人敢提起。」（校訂者註：原書作者在此略嫌誇大。祇有極少數的資料顯示很少數的物理學家警覺到這個問題。愛因斯坦的過人之處，不祇在於他解決了這個問題——因而發展了相對論——更在於他注

意到了這一般物理學者忽略的問題，而且正確地判斷這是個重大問題。」

但是愛因斯坦從來就不盲目接受權威說法，他開始就這個問題進行研究。當他還是新手的時候，他就已經發現這個已經被普遍接受的電磁理論有矛盾：光波是電磁場快速震盪的結果，「但是，」愛因斯坦問，「如果有觀察者以光速跟著光波前進，會發生什麼事？」如此一來，這個電磁場相對於這個觀察者應當是靜止不動的，但是在沒有帶電體與磁鐵存在的情形下，自然界中不會有靜止不動的電場與磁場。因此，如果有人能以光速前進，一定會有一些不可思議的事情發生。

在一九〇五年，愛因斯坦出版了一篇論文，標題寫得很溫和：「論運動物體的電動力學」，在論文中他提到，如果將光速視為對任何在勻速運動中的觀察者都是相同的話，就可以解決這個矛盾。這篇論文奠定了其後愛因斯坦撰寫狹義相對論的基礎。論文中提到狹義相對論中所有的重要基本論點，除了質能互換公式之外。直到同年年底的另一篇論文中，愛因斯坦才提出 $E=mc^2$ 的著名公式。

對於任何觀察者，光速都維持恆定的說法，乍看之下真是令人吃驚。舉例來說，假設有艘太空船相對於某顆星星是靜止的，如果船上的太空人測量傳來船身光線的光速，他會發現是每秒三十萬公里，然後把太空船加

速到光速的一半，向這顆星星航行，或是遠離這顆星星，這時再測量傳來光線的光速，發現和原來太空船未加速之前一模一樣，都是每秒三十萬公里！同樣的，如果有光束從船上發出，這道光束也將以光速前進，無論太空船以何等速度前進。

這件事情看來和常識有點衝突，但是，我們在前一章裡也看到過許多與一般常識大相逕庭的現象。例如次原子世界中的粒子行為就在巨觀世界中找不到可以相對應的類比，而相對論也告訴我們，在接近光速的環境中，很多常識必須修正，對於光本身來說也是如此，畢竟光正是以光速前進。

麥可森──摩里實驗

相對論並不是純粹思辨性的理論，正如愛因斯坦所指出的，而是用來說明實驗中發現的事實。當愛因斯坦發表相對論時，已經有證據顯示運動狀態不會影響測得的光速。在一八八七年，德裔美籍物理學家麥可森（Albert Michelson）以及美國化學家摩里（Edward Morley）進行了一項廣受討論的實驗，他們試圖測量並比較相對於地球運動下不同方向的光速。直接測量不同方向的光速沒什麼實際用處，由於當時儀器的精準度還

不足以量出有任何差異，因此麥可森與摩里就準備了一組鏡子，使得鏡子可以同時將光線折向兩個不同的方向。這個實驗用來測量不同光線在速度上的先後差別，這是可以測量的，舉個例子來說，要在沒有碼表的情形下，精確測量百米短跑選手的速度是不可能的，但是如果有了另一個選手當作比較，祇要看誰先到終點，就知道誰贏得比賽了。摩里和麥可森原本期待得到肯定的答案。那時，物理學家相信，光是由一種稱做「以太」（ether）的物質所攜帶，「以太」充斥在所有的空間之中，所以光線才能在宇宙間前進。麥可森等人認為如果光線是電磁震盪的話，自然需要透過某種介質來振動、傳遞，因為他們所知道的其他波動都需要透過介質傳遞。比如說，聲波就是空氣分子的振動，必須透過空氣傳遞，沒有理由要將光的波動特別獨立出來，認為和其他波動形式不同。

然而出乎他們意料之外的，他們卻得到了一個否定的答案。他們赫然發現不同方向的光線折射回來的時間都一樣，無論將鏡子安排成垂直或相對的角度，結果都不變，測量到的光速都一致。由於這和光由「以太」所傳遞的基本假設有所衝突，一時之間，物理學家都面面相覷，不曉得如何解釋。

「以太」理論不多時便被推翻，當愛因斯坦提出相對論後，想要找到

「以太」的企圖便完全沒有必要了。事實上，存在「以太」的假設和相對論根本不相容。如果真有這種東西存在，運動就根本不可能是相對性的。愛因斯坦破解「以太」迷思的方法很簡單，就是根本拒絕接受這種想法。他是正確的。今日的科學家已經瞭解，沒有「以太」存在，電磁學的理論並不會產生任何矛盾。

改變時間觀點

對所有觀察者來說，光速都是恆定的。這種觀念引致一些令人相當驚奇的結論。舉個例子來說，對一個觀察者來說是同時發生的兩個事件，對另外一個觀察者來說恐怕未必。如果第一個觀察者觀察到兩件事件同時發生，對第二個觀察者來說，可能是其中一個先發生，而對於第三個觀察者來說，情形又可能大不相同。

這可以透過一個假想實驗來證明。假設有一艘輪船在黑夜中航行，而在海岸上有兩處燈塔。假設岸上有一觀察者位於兩個燈塔的中間，由於燈塔閃光到達觀察者的時間一致，因此，對於岸上觀察者來說，兩個燈塔同時閃光。

假設一開始時，船與兩燈塔等距，然後向某燈塔靠近，由於船身向其

中一個燈塔靠近，而遠離另一個燈塔，甲板上的觀察者將不會看到兩個燈塔同時發光，總是會有一個稍稍晚了幾分之一秒。然而兩個觀察者都會覺得自己靜止不動，所以都依靠自己觀察到的事物做判斷，比如說，甲板上的觀察者就會覺得其中一個燈塔先發光。

實際操作上，光線行進速度太快，即便有些微差距，也不容易觀察得到，如果在太空中有艘太空船以高速前進（可能是光速的幾分之一），光線先後到達的時間差就會變得很明顯。當光源很遠，而船速極快時，這樣的時間差可能可以用年當單位，而此時「靜止」的觀察者還是覺得兩者同時發生。

從不同角度觀察具三個維度（立體）的物體，將會隨著不同角度，而有不同的外表，我們通常稱說「我們自不同角度進行觀察」，同樣的，兩個事件的時間次序也會由於觀察者處於不同運動狀態而顯得有所不同。

但是這種時間上的次序未必能被改變。如果兩者位置極其靠近，或是在時間上兩者相差甚遠，所有的觀察者都會看到其中一個在另一個之前發生。舉個例子，無論是在任何運動狀態下的觀察者，都不可能看到原子彈轟炸廣島的歷史事件會發生在日本偷襲珍珠港之前。無論是任何運動狀態下的觀察者都不可能看到投手在投球之前，打擊者已經將球擊出。至少當

觀察者移動的速度不超過光速時，這些情況都不會發生。

超光速魔球

讓我們再回到天堂棒球聯盟巡迴賽場上，貝比覺得很沮喪，因為這已經是連賽第二場的第六次打擊機會，而他一整天都沒有擊出安打。他所面對的投手是好手中的好手，一旦當他熱身完畢，沒有人可以打得到他所投出的球，因為他的球速比光速還快。

超光速魔球的問題在於當打擊者看到球的時候，球已經在捕手手套裡，因為球速比光自球體上反射到打者眼睛裡的速度還快。事實上，打擊者看到的超光速魔球是從捕手手中往回飛到投手的手套中的，因為球到捕手手中時，打擊者已經看到球，而投手投球時的影像還在半路上，所以打擊者會最後才看到投手投球。

從球的觀點來看，事情一樣很詭異。當球奔向球棒時，他比投手投球的影像還快，如果在球上站著一個小小的觀察者，他會先看到球自投手手中投出，然後當光線稍後抵達時，他才會看見投手拉臂準備投球的動作。

正如所有人都知道的，上帝是洋基隊的忠實球迷，當祂看見祂熱愛

的球隊整天都擊不出一支安打的時候，祂決定要指引貝比打擊。下一次當超光速魔球投出時，貝比發現他以超光速的揮棒速度扭身打擊，但是貝比並未擊出全壘打，而是擊出他為人所熟知的超高高飛球。球向上飛的過程中，仍舊超過光速，當球已經追上稍早前帶有球場景象的光線，站在球上的觀察天使將會看見整場球賽反向重演一次：從外野手手套中跳出高飛球，穿越球場上空，碰到打擊手的球棒，又彈回投手手套中，而計分板上記錄的比賽局數數字越來越小。

觀察天使也不會看見主審抓抓自己的頭，不知道這個向上直飛的球應該算是全壘打還是出局。

無限大能量

超光速的旅行不祇是個幻覺，如果這種事真的存在，人類真的可以回到過去，但是，如此一來，將會有一連串的荒謬事發生。例如將一台機器人送上超光速之旅，這個機器人可能在週三出發，而在前一晚的周二晚間抵達。這個機器人可能會在前一天晚上將自己解體，或者乾脆在自己的精密腦子上通電自殺，使得這趟旅程變得不可能。如果真的可以進行時光之旅的時候，不需要跑到過去將自己的祖先殺死來消滅自己的

存在，你祇要直接回到「過去」，「現在」的你就消失了。

當然即便真的有了可以從事時光旅行的機器，利用時光旅行的機會自殺的例子恐怕不會太多。至多祇是出現無止盡的迴歸，如果一個人回到「過去」自殺，那麼就不會有這樣一個人可以活到參加「今天」的時光之旅。如果這個人從週二回到週一自殺，那麼他就不會活到禮拜二去參加時光之旅，因此就不會死，而會活到週二參加這次死亡之旅，就這樣不斷的循環問句，永無止盡……。

當然，如果有人可以超越光速，當然也可以像回到過去一樣，飛進未來，不過比較少人提及未來，至少物理學家比較少，因為飛進未來不會造成矛盾，回到過去將可能改變現在，但飛進未來卻不會。

我們要從兩個不同的觀點出發，說明為什麼不可能超越光速。終究，根據相對論，相互勻速的任何觀察者觀察到的物理現象都一樣。

如果觀察者位於一艘高速前進的太空船中，無論如何都不可能追到光，因為無論速度多快，他所量得的光速都是每秒三十萬公里，亦即他所觀測的光點是以每秒三十萬公里在前飛奔而去。

如果觀察者位於地球，根據相對論，當物體不斷地加速，觀察者將會觀察到其質量不斷增加。比如說，某一百公斤重的物體以百分之九十的光

速前進，觀察者量得的質量將達兩百三十公斤，如果讓此一物體加速到百分之九十九的光速，則質量會增加到約七百公斤，但是物體上的觀察者不會觀察到自己質量上的變化。在相對論中，不同角度的觀察者將會看到不同的事物，全賴觀察者的狀態而定。高速移動的物體將會有質量上的變化，這一點已經經由實驗證實。次原子粒子在現代的粒子加速器中被加速到接近光速時，可以觀察到質量的變化，變化的幅度正如相對論所預測的一樣。

以地球觀察者的角度來看，當太空船越行越快，太空船的質量也會越來越大，這使得太空船越來越不容易加速，因為每次增加一個單位的速度，都需要越來越多的能量。較重物體的慣性就是會比輕物來大，推腳踏車總比推汽車容易。如果仔細計算將會發現，要將物體加速到光速，將需要加入無限大的能量。由於在可預見的未來，不可能取得無限大的能量，因此超光速也成為不可能實現的夢想。

這也意味著帶有無限大的物理數值未必都造成災難，光速為速度的極限就是一個例子。無限大的存在意味著不可能發生，然而，不可能發生的事物不代表不重要，例如海森堡測不準定理推定電子的位置與動量，或是時間與能量都不可能同時量得精準，就是這樣的不可能，才導致確定虛粒

子存在的重大發現。

$E=mc^2$

相對質量增加（relativistic mass increase ）的現象以及隨之產生的「無限障壁」（infinity barrier）這兩個現象的重要性，比初看之下要深遠得多。前者引導愛因斯坦發現著名的質能互換公式「$E=mc^2$」，如果能量的消耗導致物體質量的增加，似乎表示能量可以換成質量，這讓愛因斯坦直接假設無論物體在運動或是靜止，能量總是等於質量乘以光速的平方。他也發現，在此一假設之下，可以直接求得正確描述相對質量增加的公式。最自然的結論就是如果無限大無法阻止超光速的情形發生時，能量將不等於 mc^2，我們將生活在一個完全不同的宇宙。因此，「無限大」的能量之不可能存在於客觀世界之事實，對於我們理解自然世界有實質上的意涵。

相對論的發現確實是二十世紀物理界最偉大的發現之一，但是這還不像波耳假設電子在軌域中不會散失能量那樣具有革命性。波耳的發現引致量子力學的發現，而愛因斯坦的理論則是十九世紀物理學的延伸。

雖然兩者都改變了物理學家觀察世界的角度，但愛因斯坦所完成的工作是在既有的基礎上做進一步發展。保守的普朗克自己被自己發明的量子力學嚇得半死，因此花了好幾年的時間熱切地鑽研相對論。

有這樣的說法認為就算愛因斯坦沒有發明相對論，再幾年內也會有別人完成這項工作。法國數學家潘嘉萊（Henri Poincare,）就獨立發展出了一連串與相對論有關的概念。荷蘭物理學家勞倫茲（Hendrik Lorentz, 1853-1928）也是，這兩人都與愛因斯坦同一時代，直到愛因斯坦出現，勞倫茲都被視為當時最傑出的理論物理學家，他的同事提起他時，還稱他做「偉大的勞倫茲」。

我們指出這些人的貢獻並不是要抹煞愛因斯坦的成就，到現在為止，他都是當時最偉大的物理學家，他對物理的貢獻不祇一項，而每一項都有資格獲得諾貝爾獎，就算假設狹義相對論是愛因斯坦以外的人所完成的，愛因斯坦的重力理論、廣義相對論都不是當時其他人能完成的工作。

在理論上試圖突破光速限制的企圖還是得應用到愛因斯坦的理論。物理學家曾經希望第二個相對論可以解決光速限制，允許突破光速，完成時光之旅，這些是狹義相對論所不允許的。這似乎是個合理的構想。看來愛因斯坦的成就太鉅大了，以至於就算要超越愛因斯坦，還是得依靠愛因斯

坦。

來自德文的「彎曲空間」

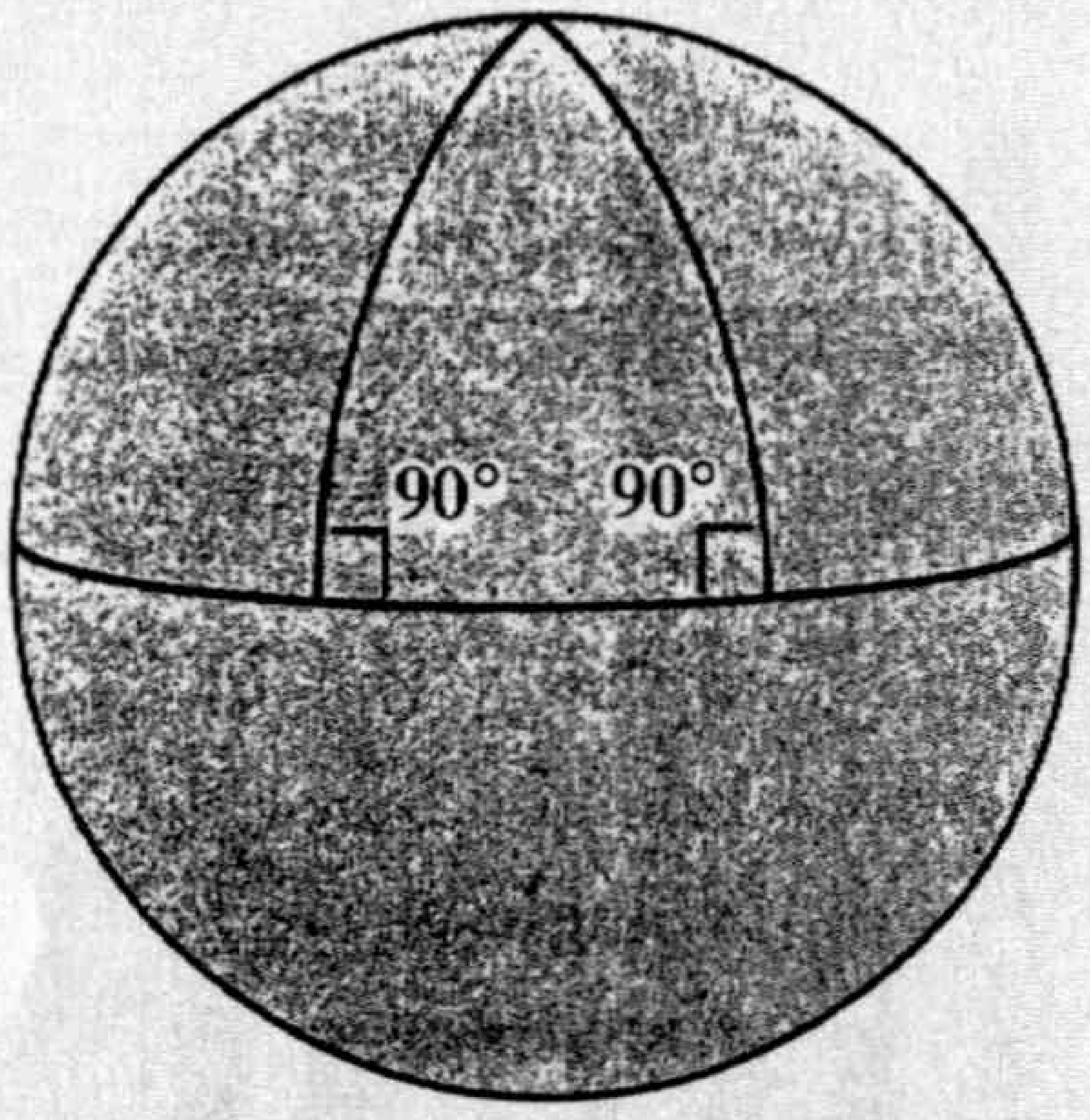
愛因斯坦斷言絕不可能突破光速的說法，始終沒有讓科幻小說家停止構想太空之旅，我自己還是物理新人時，也瘋狂地閱讀科幻讀物。即使是那時，「空間折疊」（space warp）的觀念也常被用來當作繞過光速障壁的捷徑。現在的科幻影集《星際迷航》（*Star Trek*）也常常用到這個觀念，他們在太空船裝上「曲間引擎」（warp engine），這樣就可以用「曲間速度」(warp speed)在太空中漫遊。

「折疊空間」(warp)的觀念來自於「彎曲空間」(curved space)，愛因斯坦在廣義相對論中曾提到這個觀念（我在後面兩章會詳細介紹這個觀念），原始概念指出，如果空間是彎曲的，應當可以找到方法將空間加以折疊，使得太空之旅可以變得更快。

空間不是物體，無法被彎曲，當科學家提到「彎曲」時，他們的意思是重力造成空間幾何的改變，不再像中學時所學到的歐幾里德幾何(Euclidian geometry)空間。在歐氏幾何空間中，三角形的三個內角和永遠是一百八十度；在非歐氏空間中，三角形的三個內角和可能更多，也許更

少。地球的表面正可以用來說明這件事，經線與赤道永遠垂直，但是所有的經線都在北極與南極會合，任取兩條經線，這兩條經線與赤道將成三角形，而這兩條經線也各自與赤道垂直，這意味著這個由兩條經線與赤道組成的三角形內角和大於一百八十度。

在三度空間下，地球表面是個曲面，換個角度來看，沒有任何額外的空間維度可以讓一個立體物（本身已有三度空間）被彎曲，因此這個狀況與彎曲曲面又有點差異。最簡單的說法就是，愛因斯坦的空間是非歐氏幾何空間。然而大部分論及非歐氏幾何空間的論文都是以德文寫作，而德文中並沒有用來形容「非歐氏」或是相近意義的字詞。結果，討論到「非歐



地表的幾何學正是非歐氏空間。

三角形的內角和永遠大於一百八十度，例如，經線與赤道永遠垂直，任取兩條經線與赤道間將成三角形，而這兩條經線仍然各自與赤道垂直，這意味著這個由兩條經線與赤道組成的三角形內角和必然大於一百八十度。

氏」的時候，這些德國數學家都用「彎曲」來取代。由於愛因斯坦也用德文寫下相對論，因此當相對論被翻譯成英文時，「彎曲」這個字也被夾帶進入英文的科學詞彙中。

「彎曲空間」已經成為物理學界普遍應用的詞彙，因此我並不主張將它取消掉，而代之以「非歐氏幾何空間」。祇要我們在應用時，不要忘記空間並不能像物體一樣被折疊或是彎曲。此後的章節，也將改用「彎曲空間」的說法，相反的，在科幻小說中常用的「空間折疊」觀念就純屬虛構。，如果當時的德文有「非歐氏」這樣的字眼的話，這些科幻小說家就得找出其他方法來漫遊太空了。

永遠無法完成的旅途

廣義相對論告訴我們說，我們活在一個奇妙的空間，可以使一個太空旅行家去到他沒想要去的時空地點，包括過去與未來。廣義相對論正如同狹義相對論一樣，是一個統合空間與時間的理論。這個理論指出在重力的影響下，不同觀測者，看到的「時間」也不一樣。

我們通常都不太瞭解相對論的效應，因為祇有物理學家才看得到這些以接近光速前進的粒子。同樣地，廣義相對論所預測的時間和空間的扭

曲，祇有在強大重力場的影響下，才會顯著地表現出來。在地表上，曾經進行過廣義相對論效應的實驗，但是效應太弱，祇有擁有最先進儀器的物理學家才看得到。

所以，別以為很快可以就進行時光之旅。然而從另一個角度來說，廣義相對論也讓某些物理學家推測，快過光速的時間機器（time machine）也許可以造得出來。

加州理工學院的物理學家索恩（Kip Thorne）、莫里斯（Michael Morris）以及約瑟佛（Ulvi Yurtsever）認為當科技文明到達某種程度，一定可以建造得出時光機。沒錯，這聽起來像是科幻小說，而某個程度上真的也是如此。當天文學家卡爾·沙崗（Carl Sagan）正在寫他的科幻小說《接觸未來》（*Contact*）時，他請索恩建議一種星際旅行的可能方法。這個概念讓索恩以及他的兩名博士研究生莫里斯與約瑟佛都覺得很有趣，他開始研究一種稱為「蟲洞」（warmhole）的理論主題。

蟲洞可以將兩個原本距離遙遠的地點連結起來，任何經過蟲洞的旅客都可以在一瞬間越過幾百光年的空間，所以這便是個可能可以超越光速的解答。雖然從來沒有人看過蟲洞，但在廣義相對論的計算中，蟲洞並非不可能。然而，我們可能永遠也碰不到像電視科幻影集《星際迷航》中那樣

巨大的蟲洞。計算結果顯示，如果真有這麼大的蟲洞，宇宙會變得完全不一樣。

從另一個角度來說，在10^{-33}公分以下尺寸的蟲洞便有可能存在，如果真是這樣，這些蟲洞將在宇宙中不斷地突然出現，不多久又突然消失，和虛粒子的行為差不多。10^{-33}公分，比起原子的尺寸（大約是10^{-12}公分）還要小上好幾個數量級。現代科技毫無能力處理這樣的大小，事實上，甚至可能永遠觀察不到。

這件事並未讓索恩等人覺得氣餒，他們所提出的問題是：如果科技文明進步到可以捕捉微小尺寸的蟲洞，然後將這些微小的蟲洞擴大到巨大的尺寸，那麼，這些蟲洞可不可能用來進行星際旅行？他們發現，就理論上是完全可能的，雖然實際困難度大得難以想像。從最簡單的狀況來看，要撐起具有圓形剖面的蟲洞，大約需要可以承受每平方吋10^{37}磅的特殊物質。就理論來說，擴大蟲洞仍有可能，但是要創造出能承受這麼大壓力的物質或是力場就完全不可能了，但是蟲洞仍是一種可能的星際旅行方法。

蟲洞的概念也引起其他理論物理學家的興趣，有許多的論文都在討論它，其中在仍有一大堆問題等著解決：舉例來說，有無可能創造其他形狀的蟲洞，使得所承受的壓力較小？想要利用蟲洞的星際旅行者會不會在蟲

洞中遭遇致命的力場或是輻射？太空船本身的重力會不會導致蟲洞不穩定，甚至在整艘太空船還沒完全通過之前就關閉？通過蟲洞需時多久？蟲洞可以讓太空船加速到什麼程度？

很顯然的，藉蟲洞進行星際或是時間之旅的可能性還是很低，然而還是和星際鐵路的想法相當接近，蟲洞取代火車的地位，將旅客送到遙遠的宇宙深處，如果這個想法還是無法證實，恐怕就僅是便宜了科幻作家，讓他們有更多題材可以在蟲洞中發揮。

再次回到過去

如果大型的蟲洞可以建造出來且維持運作，就可以用來當作時間機器。計算顯示，如果蟲洞的兩個開口彼此相當靠近（把蟲洞想像成某種隧道，像隧道一樣，它有開口），而其中一個開口持續移動時，另一個開口保持固定不動，穿越蟲洞可能會穿越時間，而不是穿越空間。當然這樣一來，過去無解的矛盾仍舊存在。例如，撞球進入蟲洞回到過去，撞到尚未進入蟲洞的自己，以至於原來這顆撞球無法進入蟲洞。然而如果這顆撞球從未進入蟲洞，它也就不能到過去阻止它自己開始這趟時光之旅。

這一類的猜測多半是遊戲之作，但是，這個蟲洞的猜測卻有嚴肅的學

術目的。通常物理定律被推到極限常常帶來科學真正的進展。穿越蟲洞的旅行也許不可能發生，但是祇要在理論上計算出它的可能性，或否定其可能性，科學知識就已向前跨了一步。

有時候，理論物理學家的遊戲常會引起其他科學家的激烈反應，當普林斯頓大學的物理學家葛特（J. Richard Gott）開始在設想一些比較有可能實現的時間之旅時，馬上就引起反應。有些理論物理學家想盡辦法要證明葛特的方法絕不可行，帶來短暫而激烈的論戰。

葛特的想法運用到宇宙弦（cosmic string），這是在宇宙誕生初期可能出現的奇怪事物。從來沒有人觀察到宇宙弦，但是在理論上它有可能存在。宇宙弦和超弦沒有關係，如果真有宇宙弦存在，必然是一股延長、像細絲一般的集中能量。計算顯示，像原子般大小的宇宙弦大約有十億噸重，而像足球場般長短的宇宙弦將與地球等重。

這樣重的物體不但會造成巨大的重力場，根據廣義相對論，還會扭曲附近的時間。廣義相對論還指出，如果宇宙弦存在，將會以接近光速的速度在宇宙中遊蕩。從任何角度來看，宇宙弦都是相對論中的物體。

在一九九一年，葛特發表了一篇關於關於宇宙弦的論文，他論證說，祇要有兩股宇宙弦以相反的方向交錯而過，這時如果有一艘太空船在附近

循著宇宙弦的軌跡，將可以在不必超越光速的情形下回到過去，甚至可以繼續沿著軌跡前進，回到太空船剛出發的時間點。

葛特的論文引起許多物理學家的回應，多半是試圖證明這種想法不可行，例如美國物理學家戴舍（Stanley Deser）、傑奇（Roman Jackiw）以及荷蘭物理學家霍夫特（Gerard't Hooft）宣稱找到葛特論文的缺陷，葛特當然不同意這種說法，反而指稱他的學術對手才犯了錯。特霍夫特則又回應了另外一篇論文，宣稱他已拆解了葛特的理論。

葛特再次指責他的對手錯用了論證，並且引用加州理工學院物理學家卡特樂（Curt Cutler）的論文，說明時光旅行具備可能性。到了此時，霍金（Stephen Hawking, 1942-）也加入論戰，他取笑葛特對於時光旅行的想法。霍金說，如果時光旅行真有可能，那麼我們早就遇見許多來自未來的時光旅客。霍金的計算顯示，葛特宣稱的迴圈（time-travel loop-hole）一出現時，馬上就會因為能量的集聚增加而被摧毀掉。此時，爭議已平息下來，雖然人們還不能確定葛特的設計是否行得通。即便如此，物理學家們仍繼續在廣義相對論方程式中，尋找使時光旅行成為可能的解答。即使沒什麼人相信時光之旅真正可行，但從這些探討過程，加深物理學家對廣義相對論瞭解的深度。

快子

早在時光旅行的概念形成之前，就有人提出超光速粒子，或稱為快子（tachyon）可能存在。先前曾經提過速度不可能超越光速，這句話可能不完全正確。在一九六〇年代中期，物理學家費因堡（Gerald Feinberg）以及蘇達山（George Sudarshan）認為狹義相對論並未排除超光速粒子的存在。狹義相對論祇是暗示，如果真有這種粒子存在，絕不可能以低於光速的速度運動，這些粒子將碰到另一種光速障壁。

如果快子存在，其行為必定很怪異，舉例來說，當快子失去能量時，將會運動得更快，而不會更慢。而當其能量降至零，快子將會以無限大的速度穿越宇宙。但是這些奇怪的地方無損於快子的存在。這個想法至少比狄拉克的負能量電子海，或是電子具備無限大能量及質量的說法要合理許多。

如果快子存在，而且快子的粒子束可以在實驗室中創造出來，這樣便可能可以將訊息傳回過去。同樣地，這仍舊牽涉到許多關於時光之旅的矛盾之處，例如，如果可以將訊息傳回過去，我們就可以把現代科技的藍圖傳過去，讓科技發明的時間提早，如此一來，到底這是誰的發明？過去的

人引用現在的想法，現在的想法又來自過去的成就。或者，我們也可以把莎士比亞全集傳給莎士比亞，讓他參考。這樣一來，所有的事物都將無中生有，一切事物都是未曾被發現、發明，但是卻能彼此參照的結果。

另外一個矛盾之處與時間旅行有關，假設有人死於車禍，而他的友人將訊息傳回過去，警告他要小心，這樣他就會逃過一劫，而友人也沒有必要傳出警告訊息。

在費因堡等人展示快子可能存在之後，就有許多實驗企圖偵測快子的存在，而全部都失敗了，就連費因堡自己也幾乎放棄相信快子存在的可能性，但是快子存在的可能性至今仍未被任何理論所確實排除。快子仍然有可能存在，而且大量地存在，祇是快子不會與慢於光速的粒子作用，如果是這樣，快子也許不能說是屬於「我們」的宇宙。

關於快子的存在還引發出一個相當有趣的問題，有人這樣問：如果理論指出某種事物可能存在，物理學家是否應該就當作這種事物的確存在？加州理工學院的物理學家蓋爾曼（Murray Gell-Mann）用另外一種方式表達這個疑問，這就是著名的物理學極權規則（Totalitarian Rule of Physics）：「祇要尚未被確實認為不可能，則任何事物都應當作存在」，這個規則尤其適用於研究高能粒子的物理學家。祇要現有的物理定

律不否認特定的粒子作用力存在，則物理學家就可以很自然地預期有粒子存在。然而這樣的極權規定是否為真？會不會有些時候也會跑出來一個「物理民主規則」（Democratic Rule of Physics）？如果真有這種規則，內容可能會是這樣：「祇要不被確實否認，事物就有機會存在，但是也未必盡然。」所以很明顯地，如果極權規則是絕對正確的話，快子應當存在，但是在民主規則下，就未必如此了。

到底時光旅行可不可能？

在與時光之旅的想法奮鬥許久之後，多數物理學家都希望這件事情不會成真。如果真有人或物可以回到過去，將會全然顛覆因果關係以及許多基於這種關係的物理規律。既要從事時光旅行，又要不改變物理定律的情形下，一定得有條自然律可以避免過去的事物被改變，或者要能確定時光旅客所做的任何事都不影響現有世界，才有可能不遭遇時光之旅的矛盾問題。但是很難看出自然定律如何能夠阻止某人不殺害他的祖母或他自己——如果他自己真想這麼做的話。

霍金對這個問題提出另外一套想法。他建議要有個「年代保護局」（Chronology Protection Agency）以限制時光旅行，他倒不是建議要設

立時光警察來管制時光旅客，他祇是習慣用比較有趣的方式來表達嚴肅的學術觀念。他祇是認為物理定律本身已經關閉了時光之旅的任何可能性，但是他的「年代保護」要如何執行仍是語焉不詳。或許，所有的時光機器都有很難實際操作的特性吧。然而，人們更不容易想像何種自然法則可以使時光之旅成為可能。

因此，縱使我們仍然無法排除時光之旅的可能性，也必然不太可能有成功機會。儘管物理學家試圖找出解答，但是狹義相對論中提及的「無限障壁」是很難以突破的難關。

第八章
奇異性

SINGULARITIES

大約五十億年後，太陽中用以進行核反應的核子原料將會耗盡。當此刻到來，太陽的體積將會急速膨脹，你可能以為，垂死的恆星將會變小、變暗，事實上正好相反。當恆星老化時，原先用以產生能量的核反應速率將會異常地急遽增加，這使得核心溫度大幅提高，熱能造成內壓增加，因此造成恆星體積膨脹。我們的太陽雖然還在中年階段，但是已經有點老化的跡象出現。現在的太陽亮度大約是四十五億年前地球創生之際的兩倍半，半徑也膨脹了幾個百分比。

當太陽進入死亡的歷程，變化將會更戲劇化。太陽將會變成一個熾熱而巨大的紅色巨星，它會吞掉地球而且繼續擴張，直到太陽表面大約延伸到火星軌道上。祇有等到太陽的核燃料真正完全耗盡，太陽才會開始縮小，直到變成一個微小而黯淡的白矮星（white dwarf）。

白矮星是死去的星球，發光的原因是來自於殘餘的熱，數十億年後這些熱將散盡，白矮星將更黯淡，直到變成黑矮星(black dwarf)，一顆死去太陽的殘骸在漆黑的太空中孤獨地漂浮著。

電子讓桌子穩固下來

想要瞭解白矮星的特性，得先從電子與物質間的關係談起。電子間的

彼此作用賦予物質種種特性，一張桌子之所以是堅硬固體，主要是桌子內原子的電子彼此交互作用的特別方式所產生的。原子內部的原子核，對於桌子是軟是硬並無影響，他們彼此間的距離太遠了。祇有電子才把物體的原子綁在一起。同樣，液體的性質便是由於電子並未形成永久鍵化學結的結果，反過來，固體的化學鍵便十分緊密。白矮星所表現出來的性質也是由電子相互作用的特別方式來決定的。

當星球從太陽般的大小縮成白矮星的尺寸，重力的作用將會變得很強烈，此時電子間的距離被壓縮得極小，因此，白矮星的密度便相當驚人，祇要一茶匙大小，就有數噸重。白矮星可以視為稀鬆的電子雲被重力壓縮到極小，此時，原子核對白矮星的組成仍然沒有太大影響，相對來說，彼此間的距離仍舊很遠。

白矮星並沒有一個特定的大小，它的質量不能超過太陽的一點四倍，如果超過這個臨界值，重力將會進一步造成星球塌陷，原先的電子與質子將會被「擠」在一起，變成中子，而形成中子星（neutron star）。

一般來說，在原子核內的中子相當穩定。但是，還是會有一些放射性元素的原子會放射出貝塔粒子，或是電子，如此一來，原子核內的中子就會又變成質子。自由中子也會表現出這種效應。平均來說，自由中子約會

在七分鐘內衰變成一個質子與一個電子。

如果一種核子反應是可能的，逆反應也總是可能的，中子會衰變成電子與質子，質子與電子相碰撞時，祇要能量足夠，也會形成中子，在塌陷中的星球正是如此。如果星球體積夠大，將可提供足夠的重力來引發這個反應，電子與質子不斷消失，而產生中子。

中子星相當複雜，天文物理學家們認為中子星包含電子、中子、原子核以及其他粒子，甚且在中子星的核心內，有可能是由緊密結合的夸克所組成，但仍以中子為絕對多數，並且形成中子星的特性。由於中子星所剩的電子不多了，不足以阻止星球繼續塌陷，因此，中子星的物質其密度比起白矮星還要大，白矮星的直徑比太陽要小上一百倍，中子星的直徑又比白矮星小上七百倍。

即便中子星的組成如此緊密，都還不是密度最高的天體。如果中子星的質量超過太陽的三倍，重力將會使得中子星進一步塌陷，一旦這個進一步塌陷發生，就停止不了。如果塌陷過程出現抗拒的壓力，塌陷反而會變得更迅速，而不是使塌陷停止。根據愛因斯坦的一般相對論，逆壓的存在祇會使得重力變得更強，整個星球到後來變得比一個原子核還小，黑洞於焉形成。

黑洞的密度太大，造成無以倫比的重力場，連光線都逃不出來。試想一個原本有星球大小的物質被縮小到祇有很小的體積，重力必然強大到一個程度，使得任何物體或光線一旦有進入這個黑洞，就再也離不開。而且根據愛因斯坦的一般相對論，在黑洞中心的重力將會達到無限大。

超新星爆炸

在詳細討論黑洞性質之前，不妨再多瞭解一些關於黑洞是如何形成的。巨大星體變成黑洞的死亡過程，要比普通星體(如太陽)的死亡過程戲劇化得多。當恆星的核燃料耗盡時，星球的中心將會塌陷，而變成一顆急速旋轉的中子星，重力塌陷產生鉅大的爆能量，會造成激烈的爆炸，將星球的外層拋向太空，這就是相當戲劇化的超新星爆炸。有些超新星爆炸的強光達到巔峰時，會比太陽亮度強上兩億倍，如果在我們三十光年以外的星系發生超新星爆炸，在短時間內，我們便可以看到這次爆炸，並且可以有滿月時亮度的十六倍強。縱使這個景象非常壯觀，但卻不是一件令人賞心悅目的事情，因為與亮光同來的，還有強烈的輻射線，將造成大量的死亡，整個人類文明也可能因此走進終點。

超新星爆炸是個相當複雜的過程，科學家對於爆炸的細節還不是很清

楚，但根據天文觀測的結果，中子星與超新星間的關係極為密切，例如，中國天文學家在一〇五四年曾記錄過一次超新星爆炸，爆炸的殘骸形成了蟹狀星雲（Crab Nebula）。在蟹狀星雲的中心有一顆中子星，由於亮度太低，以至於無法用光學望遠鏡觀察，但是這顆中子星所放出的無線電脈衝(pulse of the radio waves)卻很容易被觀測到，根據無線電望遠鏡觀測的結果，科學家發現這顆中子星仍在急速旋轉著。

球形的雞

諾貝爾獎得主黎德曼（Leon Lederman）在他的書《神的粒子》（*God Particle*）提到一個在工程師之間流傳甚廣的笑話：「如果物理學家想要開始研究一隻雞，他會先做出假定：『假設雞的形狀是圓形』。

當物理學家開始研究任何系統，通常第一件事情便是做出簡化過的假設，等到描述這個簡化過的系統的方程式解決之後，才開始考慮更複雜的狀況。舉個例子來說，如果有一位天文學家想要研究彗星進入太陽系之後的軌道，他考慮的第一個因素就是彗星與太陽間的重力關係，其他行星的重力所造成的影響則稍後才慢慢加入。

通常來說，從簡單的問題先入手，可以瞭解很多相關因素，例如，研

究相對論方程式所得到的第一個解導致發現黑洞。並不是愛因斯坦自己發現這件事，而是一個德國天文學家史瓦茲爾德（Karl Schwarzschild）。史瓦茲爾德在一九一五年底聽到愛因斯坦的發現時，他正在德軍服役。史瓦茲爾德一面服役，一面研究一個質點重力場的數學解，然後他發現了對於任何球體重力場的解。幾個月之後，他在軍中死於一種稀有的皮膚病，當時他才四十二歲。

天體並不見得都是球體。地球在赤道部分就有點向外膨脹，因此，看起來有點扁平。即便史瓦茲爾德的數學解，是一種簡化過的描述，根基於「天體均為正球體」的假設，但仍舊相當接近真實狀況，因此所得的解還是滿有用的。像太陽那樣大質量天體的重力場就可以經由史瓦茲爾德的解算出來。在重力場比較弱的情況，這個解會化約成牛頓反比平方律的萬有引力定律。這並不是件令人驚奇的事，因為愛因斯坦的廣義相對論並未推翻牛頓的萬有引力定律。牛頓定律在一般不太極端的情形都能適用，天文學家在大部分的運算中，也都利用牛頓定律進行計算。即便是在太陽內部，利用牛頓定律加以計算的結果與利用相對論計算出來的結果相差低於十萬分之一。因此可以說，史瓦茲爾德證明了牛頓定律是廣義相對論的一部分。

史瓦茲爾德還算出其他結果，這些結果在他的年代來說，顯得驚世駭俗。他證明一旦把具備重力的物體縮到非常小的體積，空間將會因此彎曲得非常厲害，甚至將會把這個物體與宇宙的其他部分隔離開來。任何事物，包括光線，都無法離開這個空間，但是，在一九一六年，沒有人想到白矮星與中子星的存在，更不用說是黑洞。事實上，又經過了六年，中子星才發現。史瓦茲爾德的發現並未被重視，科學家根本不相信天體可以被壓縮到這種程度。

到了一九三九年，科學家的態度並沒有太多改變。歐本海默和他的學生佛可夫（George Volkoff）發表了一篇論文，其中指出如果當中子星的質量夠大，重力效應將使得星球塌陷。同年歐本海默和另外一位學生史耐德（Hartland Snyder）發表了第二篇論文，詳細討論黑洞塌陷的狀況。但是這篇論文一樣被世人所遺忘。當時有很多物理學家參與戰爭，心中所關心的都是其他事情。即便有人讀了這些論文，大部分的人都傾向於相信星球將會彈出部分質量，以避免超越歐本海默—佛可夫極限（Oppenheimer-Volkoff limit）。其中也有些人受了愛因斯坦在同一年發表的論文的影響，愛因斯坦在論文中試圖證明黑洞不可能形成，當然這個結論是錯的，當時也並沒有「黑洞」這個詞，直到將近二十年後，「黑洞」這個名詞才

被創造出來。愛因斯坦的數學運算都是正確的，出問題的是他的假設，他對場陷物質的動力學估計錯誤。

不信者的懺悔

有許多物理學家都可以追溯他們的「科學家譜」到很早的物理學家。就拿費曼來說，他是美國物理學家惠勒（John Wheeler）的學生，惠勒曾在哥本哈根的波耳理論物理研究所待了兩年，而波耳曾與拉賽福、湯姆森共事。拉賽福曾一度為湯姆森工作，而湯姆森又曾繼任雷萊爵士的位子，擔任卡文第緒研究所的所長，雷萊又是馬克斯威爾的繼任者。

我無意為這群科學家追溯族譜，祇想為讀者介紹惠勒，他是我們這個時代最傑出的物理學家之一。在一九五七年，他開始研究高密度恆星的行為。雖然他確認了重於某種質量的恆星會場陷成黑洞，他也假設恆星會拋出部分質量，以避免場陷的命運。一九五八年時，在布魯塞爾一場科學研討會中，他認為這些超出極限的質量會轉變成輻射(radiation)，以避免遭遇臨界狀況。聽眾之一的歐本海默詢問惠勒，乾脆假設黑洞存在豈不是更為簡單？惠勒並未因此動搖，經過多年之後，惠勒仍舊認為恆星會將多餘質量轉化成輻射，以免形成黑洞。

然而惠勒卻是首次在一九六七年提出「黑洞」（black hole）名稱的人。同年稍早時，劍橋大學博士研究生貝爾（Joceyln Bell）和她的教授惠許（Antony Hewish）發現了中子星，這意味著高度塌陷的星體果然存在。中子星一被發現，黑洞的概念便突然變得合理許多，惠勒也因而變成黑洞的信仰者。

惠勒以「黑洞」來形容恆星塌陷後，質量極度集中的空間，要是他當年用了別的名字，這個概念恐怕不會像現在這樣為人所熟知，成為眾人關心的主題。〔註：這個名詞最初提出來時，為法國物理學家反對，因為在法文裡，黑洞有淫穢的含意。〕舉個例子來說，蘇聯物理學家當時使用的說法是「凍星（frozen star）」，這個意象讓人想到聖誕節的餅乾，任誰都很難因為這個名字而感到好奇。

天鵝座X—1

在銀河系中，至少存在著數以千萬計的黑洞，其中大部分都無法觀察得到，誰又看得到這些完全不會發光或放出任何輻射的「東西」呢？然而，有些黑洞卻相當明亮。是的，明亮！如果有個黑洞屬於雙星系統(binary star system)的一部分，而且和它的伴星相當靠近的話，黑洞將

會持續從另外一個恆星表面吸引物質過來。當這些物質被捲入黑洞時，將會被加速，而且升溫到將近一億度的高溫，這些高溫物質將會在被吸入黑洞前放出大量的輻射，因而可以藉由這些周邊的證據確認黑洞存在。

一九六四年，天文學家發現在天鵝座星群中，有一個物體不斷放出大量的X光，當時還無法深入瞭解宇宙中的X光源，因為地球大氣層吸收了大部分的X光，因此祇好將觀測儀器送上高空火箭進行觀測，但是在高空停留的時間很短，而且火箭不停地在動，因此觀測效果並不理想。

一九七〇年代以後，透過衛星觀察X光源之後，科學家終於可以好好地研究這個X光源，並且標明位置，現在將這顆會放出X光的星體通稱為「天鵝座X—1」（Cygnus X1）。現在科學家已經知道X光來自一個包含一顆被編號為HDE226868的藍超巨星（blue supergiant star），以及一個無法觀測到的伴星所組成的雙星系統。

現在，大部分的天文學家都相信這個無法觀測的伴星應該是個黑洞，除非所有關於恆星塌陷的理論有嚴重的錯誤。如果一個恆星的質量大於三個太陽質量的話，塌陷之後一定會變成黑洞。以最保守的理論來

估計，這個看不見的物體至少有三點三個太陽那麼重，這已經比黑洞極限要高出許多了，如果再考慮這顆藍超巨星的質量以及兩者間的距離，有人估計這個黑洞的質量大約是太陽質量的九到十五倍。

從一九七〇年代起，連續有好幾個類似黑洞的X光源被發現，這時候，已很少有天文學家懷疑黑洞的存在了。事實上證據顯示，在許多星系的中心部位都有比太陽質量大上幾千萬倍的黑洞存在。曾有一段時間，人們相信恆星會拋棄某些質量，以避免變成黑洞，時至今日，這些理論已經不再具有說服力了。

黑洞塌陷

我們在第六章曾提及，在愛因斯坦的狹義相對論中指出，無論觀察者的運動狀態如何，有兩件事絕對不會改變：光速與物理定律。而在不同觀察者的不同觀點下，包括時間與空間在內的其他事物則都有可能改變。以我們的觀點來看，在一艘以接近光速前進的太空船上的任何東西都將沿著船行進方向而逐漸縮小，而且船上的時間會慢下來。但是對船上的觀察者來說，一切正常。以船上觀察者的觀點來說，我們的時間慢了下來，而我們也正在縮小。

廣義相對論的預測效應也類似。廣義相對論說，強烈的重力場會導致時間、空間，或是「時空」的扭曲。由於在相對論中，時間與空間彼此緊密相關，因此時間與空間這兩個東西應當成為一個東西——「時空」，這一點也不神秘，愛因斯坦的相對論就是包含一個時間維度與三個空間維度。

「時間會在重力場下變慢」，這個廣義相對論的效應已經被觀察到了。如果我們可以在太陽的表面上放個時鐘，上面指出的時刻一定比地球上的時間要緩慢。這個效應其實已經在地球上觀察過，根據很精確的實驗指出，地表上的時間過得比山頂上的時間要慢，因為地表的重力場較強大。

因此，如果我們真的可以觀察恆星塌陷成黑洞的過程，我們看到的事物與恆星上觀察者看到的事物應當不一樣，因為受到重力的影響，恆星上觀察者的參考架構已經和我們的不同了。

在我解釋黑洞塌陷的過程之前，須再稍加介紹史瓦茲爾德的研究成果。史瓦茲爾德曾經計算過，當物體被壓縮到極小的體積時，會變成黑洞，他甚至可以精確地求出應當要減少到多大的體積，才會形成黑洞。

黑洞其實是恆星塌陷後，經過超新星爆炸後所剩下的殘骸，當塌陷的

物體縮小到史瓦茲爾德半徑(Schwarzchild radius)後，就形成黑洞。在黑洞形成前，整個星球是一個繼續塌陷中的中子星。以一個遙遠觀察者的角度來說，這件事不可能發生。對這個觀察者來說，當恆星體積縮小，但是重力增強時，恆星上的時間從外頭看來，則越走越慢。當塌陷程度到達形成黑洞的臨界點時，時間也在這個點上變得無限緩慢，換句話說，時間停止了。這就難怪蘇聯科學家要稱黑洞為「凍星」了。

在遠方的觀察者也不會看到物質進入黑洞，當物體接近黑洞的「事件水平」(event horizon)（根據史瓦茲爾德半徑所虛構的球體）時，物體歷經的時間將會越來越慢，極其接近「事件水平」時，時間也等於凍結，似乎這些物質將在這裡度過永遠。

重力紅位移

先前曾經提及「遠方的觀察者」，事實上，就算有觀察者，他也看不到這樣的事件，這和「重力紅位移」(gravitational redshift) 有關。什麼是重力紅位移呢？我們若從不同的方式去考察物質與光的粒子，逃開太陽的重力場，失去能量的情況，當可領悟「重力紅位移」此一現象的道理。

太陽不斷向外釋放出粒子，散布到整個太陽系，這種現象叫做太陽風（solar wind）。當這股由粒子組成的太陽風向外吹送時，這些粒子同時也失去能量。但是太陽的重力仍然會對這些粒子產生延緩作用，因而使得粒子脫離的速度變慢。

太陽的重力也會使得光線失去能量，但由於光永遠以光速前進，因此光失去能量的方式有些不同。光的能量表現在波長上，能量越強的光波長越短。因此，太陽對光的作用便是使波長變長，光的能量也因此降低。光的波長與顏色有關，波長越短越接近藍色，而波長越長越接近紅色。因此如果從太陽發散出來的光的波長變長了，亦即變得較紅些，就表示光的能量減低了。

太陽的重力不夠大，因此重力紅位移效應並不明顯。但是在塌陷恆星附近的重力場就很大，紅位移的程度就會變得很明顯。對正在觀察恆星塌陷過程的觀察者來說，他會發現恆星變得越來越紅，當恆星進一步塌陷，質量密度變得更大時，附近的重力就越來越大，紅色的光將會進一步變成紅外線，然後變成波長長於可見光的無線電波。

當塌陷繼續進行時，波長將會變得越來越長，而能量越來越低。當達到「事件水平」時，重力紅位移將會達到無限大，波長無限長，而能量降

為零。對於外界觀察者來說，他將看見塌陷中的星球越來越黯淡，直到變成全然的黑暗。

無限大不過是個幻影

正如我們先前提及的，在物理理論中祇要在內容中牽涉到「無限大」，多半是錯誤的理論，或者就是一件不可能的事。紫外線災難讓物理學家知道原有的黑體輻射公式有漏洞，因而讓普朗克發展出量子力學；而預測以光速運動的物體將具有無限大質量的說法，讓愛因斯坦確定了物體不可能達到光速。

可是在黑洞的例子，問題就變得令人迷惑。對一個遠方的觀察者來說，將會發現不僅在「事件水平」上，時間變得非常慢，而且當星球達到史瓦茲爾德半徑時，從塌陷恆星表面輻射出的光線波長會變成無限長，而能量則降為零，這等於是說，在這上面的任何事物，包括光線，都被永遠地「凍結」了。令人驚奇的是，對於位於塌陷恆星表面的觀察者來說，一切正常，在「事件水平」上並未凍結任何事物，而恆星仍舊以很快的速度向內塌陷。

這位觀察者也將發現在「事件水平」上的一切跡象都很正常。事實

上，如果沒有精密儀器協助的話，觀察者也不會發現到事件水平的存在以及任何不尋常的事物產生。當然這都是虛構的觀察者，沒有誰真的能上去觀察。如果真有人上去，就算沒有被強烈的輻射殺死，也會被極端強大的重力場所撕裂。如果觀察者先將腳伸進黑洞，將會發現，腳所承受的重力比頭部大得多，因而將觀察者拉扯成一條極細、極長的條狀，物理學家稱這個過程為「拉成義大利麵」(spaghettification)，這條可憐的義大利麵還將繼續被拉進黑洞的中心。

以遠方觀察者的角度來說，中子星塌陷成黑洞，需要無限大的時間，而就站在中子星表面的觀察者來說，整個過程祇要一天。由於塌陷時重力場變得相當強大，以至於位於不同位置的兩個觀察者將體會到完全不同的時間節奏。再也沒有比這件事更矛盾的了。這個矛盾可以從製作地圖引起的問題來類比瞭解。

我們都曾注意過利用一般麥卡托投影法(Mercator projection)製作的地圖，越接近高緯度，地表面積顯得越大。格陵蘭的面積甚至比真實數字還要大上好幾倍，製作二維的平面地圖總是無法避免出現這種扭曲，因為球形的地表無法完全精準地製成平面的地圖。

如果仔細看，也將發現在以麥卡托投影法製作的地圖中，並未畫出北

極或南極，總是會切掉一部分緯度，這是因為如果不切掉這些緯度，繼續畫下去的話，扭曲將會變成無限大，因為在極點上，一個小小的點將會被延伸成一條直線，其長度等於地圖的寬度。

黑洞中正有類似問題，因為對遠方觀察者來說，整個塌陷過程似乎像是「凍結」了一般，但是這祇是個幻象。在一九五八年，美國物理學家芬克斯坦（David Finkelstein）建立了一個觀察恆星塌陷過程的參考架構。在這個參考架構中，存在著一個可以同時包含遠方觀察者與恆星表面觀察者觀點的立足點。在芬克斯坦的參考架構中，不需要無限長的等待時間，就可以看到星球塌陷成黑洞的過程，這就像有人以地球儀取代投射地圖一樣，將扭曲全部去除掉，極點也不再因而變成直線，這也意味著，即便是遠方的觀察者也必須同意恆星的確會塌陷成黑洞。他們看不到的理由是因為恆星塌陷至「事件水平」時，強烈的重力將光線的能量全部抽走，以至於觀察者根本收不到相關的訊號。

無限大的密度

就算我們找到一種可以應付時間被無限扭曲的方法，仍然有其他無限大的數量困擾我們。廣義相對論的「史瓦茲爾德解」對於恆星的塌陷過程

提供了一個非常實際的描述。恆星一旦穿過「事件水平」，速度將會越來越快，直到整個恆星的質量都被壓縮在一個維度為零的幾何點，這個點稱做奇異點(singularity)。在奇異點上，物體的密度與重力都是無限大，試想，一個太陽大的物質現在壓縮成一個數學上的點。

廣義相對論的史瓦茲爾德解並沒有考慮轉動的因素，這意味著黑洞的形成似乎還要更複雜些。幾乎所有的天體都會對應著自己的軸旋轉，地球以地軸每廿四小時自轉一次，月球則每繞著地球轉一周，它本身也同時自轉一次。太陽也會自轉，連星系都在自轉，當然，中子星也會自轉。

正如我先前提出的，相對論的方程式都相當複雜，而且難以求解。史瓦茲爾德之所以可以求出一組解的原因是因為他做了很多假設，以簡化問題，而直到將近半世紀之後，才由紐西蘭數學家克爾（Roy Kerr）在一九六三年找到將旋轉因素考慮在內的解。稍後，也證明了克爾的解可以用在黑洞塌陷。目前科學家正在將「不旋轉的史瓦茲爾德黑洞」（non-rotating Schwarzschild black hole)與「會旋轉的克爾黑洞」(spinning Kerr black hole) 分開來，因為前者祇是數學上的理想物體，在自然世界中並不存在。

克爾解的發現導致奇異點是否存在的問題，旋轉會不會阻止在黑洞的

物體被壓縮成為數學上的點？如果有自轉，塌陷中的星球還是球形嗎？會不會因此而對塌陷過程有所影響，以至於僅僅被壓縮至極小的體積，而不是點？

英國數學家潘洛斯（Roger Penrose）在一九六五年回答了這些問題。他證明了祇要廣義相對論方程式是正確的，奇異點必然存在。潘洛斯無法證明在黑洞中的任何物體都會被壓縮成沒有體積的點，但是他證明了將有個奇異點，其引力會達到無限大。

奇異點真的存在嗎？

數學家不斷碰到奇異點的問題，舉個例子來說，當X等於零時，以零為分母的分數就會形成一個奇異點。當X值越接近零，分母也就越小，當X真的等於零時，整個分數將會變成無限大。但是沒有什麼人真的費事來理它，這祇是一種抽象的數學遊戲。

從另一個角度來說，當物理理論處理到無限大的時候，情形就完全不一樣了。譬如說，祇有兩種方式可以用來詮釋奇異點存在於黑洞之中的說法：要嘛，在奇異點上時間及空間不存在了；否則，就是在奇異點上，用以預期奇異點存在的理論失靈。無論哪一個說法，都意味著在奇異點上，

一切既知的物理定律都派不上用場。

當一個粒子抵達奇異點時，將感應到無限大的重力及潮汐力，同時被擠壓成點和被拉扯成碎片。在抵達奇異點之後，沒有什麼地方可以容身，也不會再「前往」何處，因為這個粒子已經來到空間的邊緣以及時間的終點。曾經有人認為粒子抵達奇異點後，會通過蟲洞，然後抵達另一個宇宙，但是，終究被證明為不可能發生的事，因為這種蟲洞一出現，馬上消失，時間太短，沒有任何物體可以通過蟲洞。

但是另外一個可能的說法是，在奇異點，廣義相對論會失效。為了描述這個發生在奇異點附近的事件，就必須將量子力學結合進來，換句話說，就是要建立一個量子重力理論，但是沒有人知道怎麼著手，因為引力沒有辦法被重正則化。

廣義相對論無法應用在 10^{-33} 公分或更小的尺寸，這個值被稱為普朗克長度(Planck length)，這是因為在這個尺寸之下，量子的作用太大，以至於愛因斯坦的廣義相對論在這裡派不上用處，10^{-33} 是個很小的值，大約是小於原子核的 10^{21} 倍，但是這樣的尺寸還是比「點」要大上無限多倍。因此，有些物理學家認為物質會在黑洞中僅僅被壓縮至這個尺寸，而非變成一個幾何點。無論奇異點的體積是 10^{-33} 公分或是小到根本就沒有體積，

這都不影響黑洞的其他性質：一個奇異點，四周有個「事件水平」，在這兩者之間不存在任何事物。

超弦理論企圖要統一所有四種基本力，因此如果這種理論的確發現了，我們將會得到一個量子重力的理論。由於未來數十年內，不太可能找到這樣的理論，我們祇能推測在10^{-33}公分的尺寸中，會發生什麼狀況。有可能時間與空間在這一地方都消失了，因為已經有人指出，時間與空間未必是最基本的物理量，就算事實並非如此，我們很可能會發現在「普朗克區域」(Planck region)裡的事件和日常世界大不相同，其差別比量子力學或相對論的世界與日常世界的差別更大。

還倖存的無限大

如果真的發展出量子重力理論，並不見得一定會推翻遠方觀察者所做出的結論：當塌陷中的恆星掉向「事件水平」時，時間流動的速度越來越慢，或說是在我們的參考架構下，沒有真正的黑洞存在，祇有因為大量星體物質集中在「事件水平」上，拼湊成「凍星」的結論。黑洞不存在於參考架構中的原因，在於以我們的觀點來看，要形成黑洞需要無限長的時間。

這個結論並未因為觀察到類似天鵝座X—1雙星系統而被推翻，反而被用來說明無論黑洞的質量集中在「事件水平」之上或是「事件水平」之內，都不會改變黑洞的行為。牛頓在幾個世紀以前就已經有過類似的分析：任何球體對其他物體所表現出來的吸引力，與假設質量集中於球心的計算結果是一致的。因而，沒有必要引用廣義相對論再來證明這件事情。因此在其他弱重力作用的環境，牛頓的反平方律仍有用。

航向另一個宇宙

要討論黑洞似乎不能忘記「航向另一個宇宙」這個話題，雖然這個話題和黑洞中的無限大的關係並不密切，但是太多人討論它，讓人根本無法完全忽視這個話題。

當物理學家深入研究「克爾黑洞」的種種細節後，發現粒子可能會掉進一個黑洞，而不會遇到奇異點。而數學理論又進一步推導出這些粒子可能會航進另外一個宇宙，同樣地，這些粒子會從這第二個宇宙繼續航入第三個宇宙，以至無窮盡。

有人認為存在於星系中心的大型黑洞將有可能成為進行宇宙間旅行的管道，由於這些黑洞的體積都很大，因此其史瓦茲爾德半徑也相對變大許

多，由於在這種大型黑洞中的「事件水平」與奇異點間的距離非常遙遠，潮汐力也就不像由一個恆星塌陷形成的黑洞的潮汐力那樣強大，因此太空船輕鬆進入的可能性也因而大增。

當然這可能是一次有去無回的旅程，太空船可能永遠也離開不了黑洞，而和其他物質一樣被黑洞吞噬，但是也有可能沿著克爾解中的一條軌道進入另外一個宇宙。從這個角度來看，太空船也可能進行一系列這樣的航行，而最終居然又回到原先的宇宙，但是出現在不同的時間與空間。

雖然在這個話題上已經累積了無數的討論，但是這很可能僅僅是理論上的空想而已，廣義相對論的克爾解誠然將黑洞的旋轉也考慮在內，但是正如史瓦茲爾德解一樣，克爾解仍舊簡化了許多細節。從來沒有任何一位物理學家或數學家可以就廣義相對論，提出一套可以解決實際問題的廣義解，總是會做某些數學上的簡化。因此，如果將「史瓦茲爾德解」形容成「一隻圓形的雞」，「克爾解」也祇不過是把雞描述得更為清楚一些而已，於是我們就可以看到「一隻有著橢圓身體及球狀頭部的雞」。

第九章

宇宙是有限或無限？

IS THE UNIVERSE FINITE, INFINITE, OR IMAGINATION?

宇宙到底有限或無限？關於這一點的爭執已經反覆進行將近兩千五百年。宇宙是無限的，而且其中包含了數不盡的世界，這個概念在蘇格拉底之前，已有一些希臘哲學家提倡過了。最著名的是戴謨克利脫（Democritus）。亞里斯多德並不同意，他認為宇宙有限的，「無限大」不可能真正存在，至多祇有「潛在的無限大」。亞里斯多德原以為他已經將這個問題釐清了，但是認為宇宙無限大的想法始終未曾消失，再次滲入希臘哲學家伊比鳩魯（Epicurus, 342-270 B.C.）思想中，羅馬詩人留克利希阿斯（Lucretius, 96-55 B.C.）在他的長詩《論萬物本質》（*On the Nature of Things*）中，闡述了將伊比鳩魯的想法。

在中世紀時代，亞里斯多德的思想權威不斷擴大，宇宙的有限性也就成為教會基本理念之一。當布努諾（Bruno）讀了留克利希阿斯以及一些蘇格拉底之前的哲學論述之後，發展了多元世界（plurality of worlds）的說法，並因此而被判為異端。但不久，事情的發展又擺盪到另一端，在十七世紀時，宇宙無限的想法已經深入人心。

這種搖擺也出現在二十世紀。常常科學家已經相信宇宙有限，卻在不久又傾向另一極端。事實上，有個時期，許多強有力的證據似乎都暗示著宇宙是無限的，但是最近意見又變了。當我寫這本書時，相當多數的物理

學家以及天文學家相信我們的宇宙極靠近一個分界線，因而我們無法論定到底宇宙是否無限。

根據愛因斯坦的廣義相對論，我們宇宙的空間平均曲率(average curvature of space)可正可負，如果曲率為正，宇宙就是有限而自成一個封閉格局；如果曲率為負，宇宙就是無限。這裡還有第三種可能，如果宇宙的空間曲率為零呢?這種宇宙是無限，但是祇是「剛好到達」無限大。為什麼說「剛好到達無限大」?因為，祇要曲率為正，無論這個值有多小，宇宙就是有限的。一個曲率為零的宇宙就真的位於有限與無限之間的分界線上。

測量星星的距離

在一九一〇年左右，天文學家觀察並登錄了數百顆星星，恆星所發射出來的光中，天文學家對於星體上大氣的化學成分有了相當程度的認識。但是，這些知識並不能讓天文學家瞭解這些恆星距離我們到底有多遠。大部分的恆星都集中在銀河裡，但是我們卻完全無法知道這些星體有多遠，也不知道這些巨大星團的結構或尺寸。那時要測量恆星的距離祇有一種方法，就是測量恆星視差。如果某個恆星距離地球很近，則在地球所觀測到

這個恆星在遙遠星星背景下的位置會因為地球的繞日運行而產生位移。這個星球與地球的距離便可以利用三角測量來計算。

然而，這種恆星位移的數值相當小，例如半人馬座α星(Alpha Centauri system)是離地球最近的星座，大約祇有四光年的距離。即便如此，與地球繞太陽公轉的軌道直徑相比，四光年仍然是一個太大的距離。一光年大約接近十萬億公里，而半人馬座α星在半年的位移變量大約祇有零點七五秒的弧度，或者說是五千分之一度，以比例來看，相當於在兩英里外觀察一元硬幣的直徑大小。這樣的角度大小還是可以測量得出來。但是對於更遠一點的恆星來說，就觀察不到恆星視差了。今天，天文學家可以利用這種方法測量大約數百光年以內的恆星，但是這離天文學家的標準還很遠，例如，地球與銀河系中心的距離約三萬光年，而銀河系的橫斷面約有十萬光年的長度。

在二十世紀初期，恆星視差測量法的準確度還不及今日的十分之一，因此，天文學家所能測量到距離的恆星不超過數百個。如果有某個恆星就是不表現出恆星視差時，天文學家就根本沒有辦法得知這個恆星與地球間的距離。就算測量到恆星的視亮度（apparent brightness）〔註：指在地球上所能觀測到星體的亮度。〕，也毫無用處。如果有一顆恆星

視亮度較強，這有可能因為它的亮度真的比附近星體要亮，但也有可能是因為這個恆星距離地球比較近。這等於說，直到那時天文學家祇能以二維的方式來研究星空。

因為，天文學家祇有運用恆星視差這個能力有限的方法來測量恆星的距離，因此，當時天文學家無法確定當時已觀察到的星雲的本質，這些「星雲」是天空中恆星之外，可觀察到的發亮的雲狀物。有些星雲的形狀是不規則的，另一些星雲具有螺旋狀的結構。在十八世紀德國哲學家康德認為具有螺漩結構的漩渦星雲(spiral nebula)應當是巨大的星系。然而，在二十世紀初期天文學家都相信星雲是氣體組成的漩渦，新生的星球就在這裡不斷地形成。如果當時的天文學家知道這些星雲離地球有多遠時，他們就會知道這些星雲其實是由大量的恆星聚集在一起，否則這些天體所發出的光，其強度不足以讓我們從遙遠的地球觀察到。

二十世紀初期的「電腦」

時至今日，天文學已經很成熟了。專業天文學家很少以肉眼進行觀察，而是透過望遠鏡以電子偵測器蒐集星光，然後再由電腦彙整數據。從某個角度來說，這種方式與廿世紀初期天文學家前輩所使用的方式有令人

驚異的相似之處，舉個例子來說，他們都有自己的「電腦」。

二十世紀初期的天文學家學花費很多精神與時間來蒐集數據，天文學家觀察數以千計的星星，然後再將這些數據填進天文表中，這些工作相當繁瑣，幾乎每個大學的天文學系中，都有個裡面坐滿人的小房間，這些人是聘用來填寫星星的名字以及數不盡的表格。在哈佛大學天文台中，大部分的雇員都是女性。她們的老闆，天文學家皮卡令(Edward Pickering)每小時付給這些雇員二十五分錢，然後把她們稱作計算機(computer)。皮卡令最後彙整了二十五萬張天文圖表，以及整整七巨冊的哈佛天文學年鑑(Harvard Observatory Annal)。

在一九一二年，皮卡令的「計算機」之一發現了一件事，造成整個天文學界的大改革。李薇特(Henrietta Leavitt)接到皮卡令的指示要找出變星(variable star，會不斷改變亮度的星星)。當李薇特在計算時，她注意到某類變星叫「造父變星」(Cepheid variable)，其真正亮度與亮度變化的週期間存在某種關係，即變星的真正亮度越大，亮度變化的周期也就越長。〔註：亮度變化的周期以及視亮度都很容易測量出來。〕如果我們可以測出某個造父型變星的距離，便可求出造父型變星真正亮度與亮度周期的比值。據此，便可算出所有造父型變星的真正亮度，從而求出這些

變星的距離。這種方法有點像以計算燈泡的亮度來計算燈泡與觀察者間的距離，如果知道燈泡的功率（即知道燈泡的真正亮度），再從觀察到的燈泡亮度（就是燈泡的「視亮度」），就可以算出燈泡的距離。

星雲的王國

有了這種新技術，天文學家忽然可以算出每顆星星的距離，包括非造父變星。如果雙星系統(binary star system)之一是顆造父型變星，天文學家就可以根據這顆造父變星的亮度周期算出它的距離。然後，天文學家也可以算出另外一顆伴星的距離。〔註：由於雙星系統兩顆星球彼此距離很近，從遙遠的地球觀測，這兩顆星球與地球各自的距離可當作相等，因此祇要知道其中一顆變星的距離也就知道另一個的距離。〕如果，可以得知這顆伴球的距離，我們就可以求出變星真正的亮度。同樣地，可求出其他類似星球的真正亮度。更且，天文學家已經發現，我們的銀河系被數群球狀星團(globular cluster)所環繞，這些星團距離我們太遠，以至於可以假設同一星團的所有星體與地球間的距離大致相近，祇要知道其中一個星體的距離，其他星體的距離也就相距無幾了。

恆星可以依照顏色加以區分，恆星的顏色與該星球表面溫度有關。舉

個例子，獵戶座ε星（Epsilon Orionis）是個藍巨星，表面溫度約有攝氏兩萬五千度，並被歸類為BO等星。我們的太陽是個中等體積的黃色星球，表面溫度約有攝氏六千度，被歸類為G2等星，所有在同一等級的恆星都會有同樣的真正輻射度(intrinsic luminosity)。〔校訂者註：亮度指星球發射出可見光的總能量；輻射度包括可見光與不可見光－紅外線、微波、紫外線、X射線等。〕因此，祇要知道這個星等內任何一顆星的距離，其他同等星的距離也可以計算得知，唯一要做的事情就是測量這些星的「視亮度」。得知距離之後，就可能辨認出星群的大小與形狀，比如說我們的銀河系就是一個例子。

夏普利與哈伯

根據對於恆星真正亮度的知識，美國天文學家夏普利(Harlows Shapely)大約估計了我們銀河系的大小，並確定太陽位於我們銀河系之中。夏普利估計我們銀河系直徑達廿五萬光年，比現在公認的數值要多出兩倍半。即便誤差不小，但是仍舊為天文學界帶來貢獻，過去天文學家原本完全沒有辦法估計我們銀河系的直徑大小，原先也以為應當不會超過數千光年而已。

夏普利相信漩渦星雲位於我們的銀河系之外，如果真是如此，這意味著漩渦星雲非常大，和我們的銀河系大小差不多，以二十世紀初期的術語來說，漩渦星雲就是另一個「島宇宙」(island universe)。但是，夏普利無法證實這個理論。當時的望遠鏡倍率不足以分辨出在遙遠的星系內個別的恆星。因而，他也無法否定漩渦星雲是我們銀河系內部氣體雲的說法。

這項工作由美國天文學家哈伯(Edwin Hubble 1889-1953)完成。哈伯的人緣並不好，他的行為顯得疏離冷淡，有時甚至粗魯不文。出生在密蘇里的哈伯說著一口標準的牛津腔，讓人覺得他在裝模作樣，雖然他真的是牛津畢業的。夏普利自己就深信，如果哈伯在半夜被人搖醒，哈伯一定會不小心地露出密蘇里口音。

哈伯是二十世紀最偉大的天文學家之一，當他在一九一九年，第一次世界大戰結束後退役，他到加州威爾遜山(Mount Wilson)加入建造一百英吋望遠鏡的工作。他堅信漩渦星雲一定是個獨立的星系，他非得證明這件事不可。

哈伯首先證明了不規則形狀的星雲確實位於我們銀河系之中，而且正如多數天文學家所認為的：不規則星雲由氣體所構成。接著，哈伯又把注

意力集中到漩渦星雲上。他在一九二六年時在M 33星雲中發現一顆造父型變星；一九二八年，又在仙女座的漩渦星雲(Andromeda nebula)中發現另一顆造父型變星。這兩個發現，不但證明了漩渦星雲不是氣體，而且還可以進一步測量出這些天體的距離。結果發現這些渦狀漩渦星雲的距離遠得不得了，明顯地超出一般天文學家的想像，這真是一個非常意外的大發現。一九〇一年時，天文學家以為整個宇宙的大小不過數千，至多數萬光年。哈伯卻發現，原以為是氣體的漩渦星雲遠在數百萬光年之外。

宇宙的擴張

在研究星系的過程中，哈伯發現大部分的星系都快速地遠離地球和我們的銀河系而去。他運用都卜勒效應(Doppler effect)，計算得知星系遠離的速度。一八四二年，澳洲物理學家都卜勒(Christian Doppler 1803-1853)致力於研究移動音源與音波頻率之間的關係。他注意到當火車迎面而來時，汽笛的音調明顯升高，當火車錯身而過後，汽笛的音調又逐漸降低。

都卜勒的分析相當簡單。因為聲音具備波的性質。如同海浪一般，

一個完整的波包括波峰和波谷，音波的波峰區域代表空氣分子被壓縮的區域，而波谷則代表空氣分子稀鬆分散的部分，聲音祇不過是一道經由空氣傳遞的壓縮波。

當物體移向觀察者時，每一次波峰出現的時間差都比原來要短，這使得波峰彼此間的距離越來越近，頻率因而變快，這意味著音調升高。另一方面，當音源離開觀察者時，每次波峰出現的時間差都比原來長，頻率變慢，波長也變長，音調便降低了。

光也具備波的性質，也會出現都卜勒效應。當光源高速遠離觀察者時，波長將會變長，因而出現紅位移；當光源高速接近觀察者時，波長會變短，此時會出現藍位移。

高速遠離地球的星系並不會因此看起來呈現紅色，事實上，這些星系的外表看起來仍和未發生紅移或藍移一樣。因為當可見光出現紅位移而進入紅外線區時，原先的紫外線也因為同樣的紅位移而成為可見光。然而，不管是紅位移或是藍位移，其波長位移的大小都可以精確測量得知。祇要檢定某些特定波長與在星體大氣層中發現的特定元素的關聯性，就可判定光譜移動的程度。如此，藉由觀測遙遠物體所放射出來的光，天文學家可以確定該物體遠離的速度以及其化學成分。

當哈伯研究遠方星系所呈現出來的都卜勒移時，他發現，大部分的銀河系遠離地球，但還是有少數星系移向地球，仙女座星系就是一個例子。〔註：位於仙女座的漩渦星雲其實不祇是一個星系，而是一團星系，總共大約有兩打星系在這個星雲內。這些星系以非常複雜的方式，彼此互繞運轉著。〕更重要的是，他發現速度與距離間存在一個簡單的關係。如果B星系距離地球有A星系的三倍遠，那麼B星系移動的速度便是A星系的三倍快。如果C星系的距離有十倍遠，移動的速度也會十倍快。

從地球觀察到銀河系向外移動，並不意味著地球或是我們的銀河系就是宇宙的中心，而宇宙的其他部分都爭先恐後地想要遠離我們。星系看起來急速遠離地球的原因，在於這些星系，包括我們自己，彼此都在相互遠離。我們可以將宇宙類比成一團正在發酵中的葡萄乾土司麵團，當麵團發酵時，葡萄乾彼此間的距離將會拉大。如果將麵團邊緣的一顆葡萄乾當作參考點，站在這顆葡萄乾上的觀察者將會發現其他葡萄乾都在逐漸遠離，而在另一端的葡萄乾跑得最快。正如所有的類比一樣，都會碰到不能完全類比的時候，麵團有明顯的邊緣，但宇宙沒有。

哈伯談到的是個別星系相互遠離。今天我們知道多個星系結成一個大星團，有些更是由多個大星團再結成一個超大星團。〔註：宇宙的膨脹主

要是以這些大星團或超大星團為單位，而彼此相互遠離。」這並不影響宇宙膨脹的分析。如果將麵團裡的葡萄乾設想成為星團，一切情形完全一樣。

星系與星系團彼此遠離的原因，並不是因為有不可知的力在神秘牽引，而是宇宙空間不斷膨脹的結果。整個情形可以簡化為一個單純的事實：隨著時間逐漸向前推進，宇宙間的物質仍舊保持一貫的相對位置，但是彼此間的絕對距離卻變大了。宇宙間的物體可以保持一貫相對位置的原因，是因為和宇宙的膨脹速度比起來，所有其他運動的速度都變得微不足道。不錯，我們銀河系與星團中的其他成員以每秒六百公里的速度在太空中運動，但是和遠方星系移動的速度比較起來，每秒六百公里的速度簡直不算一回事，因為遠方星系可能是以幾分之一的光速在移動。

愛因斯坦犯下最大的謬誤

愛因斯坦在一九一六年發表廣義相對論後，開始試圖將他的理論進一步推演到整個宇宙的尺度。他發現他所提出的方程式暗示著宇宙一定在進行著某項運動，要不是擴張，就必然是縮小。很自然的，他被這個發現震驚了。因為自古以來，所有的哲學思想都認為宇宙是靜止的。亞里斯多德

說整個宇宙是不變的，哥白尼、伽利略以及牛頓也有類似的看法，二十世紀初的天文學家也都一樣，一個非靜態的宇宙是不被考慮在內的。

愛因斯坦經常質疑已經為大眾所接受的科學概念，但是這次，他並不打算推翻流行的想法。相反的，他試圖建構一個可以解釋靜態宇宙的理論。他注意到他的宇宙方程式允許加進一個常數(雖然未必需要)，愛因斯坦在其中加入一個常數，然後稱之為「宇宙常數」(cosmological constant)。正如字面意義所指出的，這個常數有一個簡單的物理詮釋。這個宇宙常數等於是一種斥力，可以平衡掉遠距離間的重力。不錯，這個斥力看來相當詭異，和其他已知的物理作用力大不相同，但是這提供了愛因斯坦所需要的結論：宇宙不因時間而改變。

愛因斯坦這個作法還是行不通。一九二二年，蘇聯數學家傅里德曼(Alexander Friedmann)證明了即便加入愛因斯坦的宇宙常數，宇宙仍然不是擴張便是縮小。傅里德曼發表論文，指出靜態宇宙不過是個假設罷了，這個假設卻與觀察事實不符。愛因斯坦一開始抱持著懷疑的態度，他認為傅里德曼一定是錯的，但是在仔細研究過傅里德曼的論文後，愛因斯坦承認傅里德曼的計算是正確的。即使如此有很長一段時間，愛因斯坦還是認為宇宙應當是靜止的。

一九二七年，比利時數學家勒梅特(George Lemaitre, 1894-1996)發現：即便愛因斯坦的理論正確，宇宙也絕對不可能是靜止不動的，愛因斯坦所描述的宇宙並不穩定，任何一點點小小的擾動都會影響宇宙的平衡狀態。靜態宇宙的平衡正如同一枝以筆尖著地試圖保持平衡的鉛筆一樣，任何時刻都可能傾倒。靜態宇宙就是無法保持平衡。

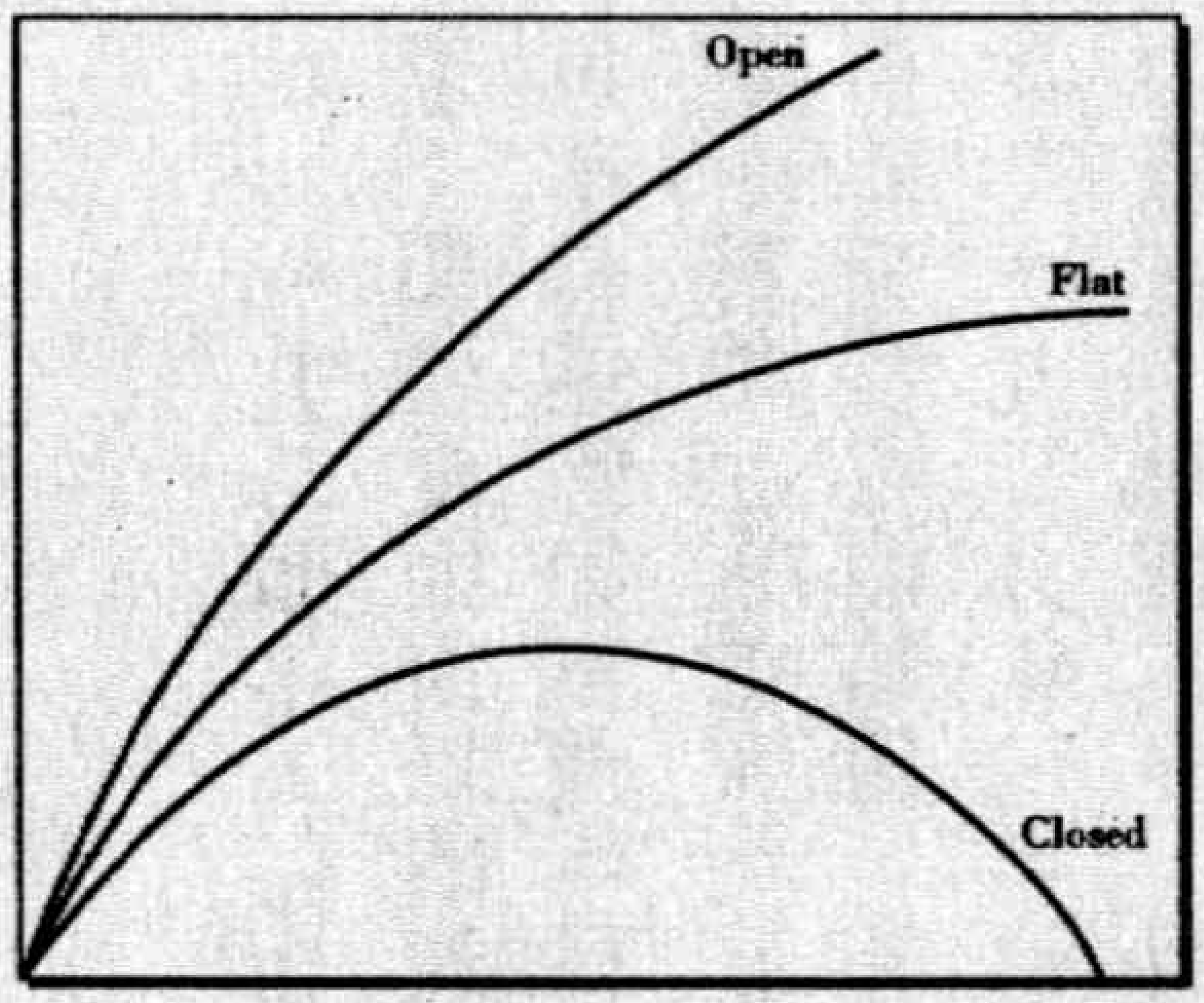
一九二九年，哈伯終於宣布他發現星系正在遠離。經驗證據指出宇宙的確在不斷擴張中，而愛因斯坦終於在兩年後放棄他的靜態宇宙論點，並且稱之為在他的物理事業中最大的謬誤。

宇宙是開放的，抑或是封閉的？

如果宇宙正在膨脹中，必然會引發這樣的問題：宇宙會會永無止境地膨脹下去，或是宇宙物質的重力終於使膨脹停止下來？終究宇宙間的所有粒子都對其他粒子產生引力，但是，誠然，重力並不是那麼強大的力。舉個例子來說，如果以磁鐵吸引桌上的鐵釘，一小塊磁鐵對鐵釘的吸引力，遠遠超過整個地球對這根鐵釘所產生的引力。但是宇宙中的物質那麼多，加總起來的引力也十分巨大。如果宇宙不會因重力而停止膨脹，至少會因此減緩膨脹的速度。

如果可以知道宇宙膨脹的速度，就可以計算出宇宙的密度必須達到多大的程度，才能讓宇宙停止膨脹。這個宇宙臨界密度大約等於每立方公分5乘以10^{-30}公克或者相當於每立方英碼中有三個氫原子。不幸的是，科學家無法直接測量宇宙的密度，天文學家僅能估算星球密度，但是對於宇宙中其他物質就幾乎束手無策。而星球的總質量祇估宇宙總質量的十分之一以下。直到現在為止，天文學家還不知道宇宙中有多少不會發光的物質。

如果宇宙密度大於臨界值，廣義相對論的方程式告訴我們宇宙膨脹終將停止，而且宇宙是有限大的。如果宇宙間有足夠的質量可以讓膨脹中止，也就會有足夠的質量可以讓空間向自己彎曲。這種宇宙稱為封閉型。



開放的宇宙永遠膨脹不停，星系間的距離也將不斷增加。平坦宇宙仍舊會膨脹，但是膨脹的速率最終會變得極小，小到幾乎觀察不出來。封閉型宇宙膨脹終將停止，然後會回縮，直到變成一團質量極為集中的狀態，變成與大霹靂相反的大崩墜(big crunch)。

在封閉型宇宙中，空間的平均彎曲率是正值。封閉宇宙中的空間可以和地球的球型表面相類比，如果封閉型宇宙存在的時間夠久，從某一點出發的太空船將會在幾十億年後，從另外一個方向抵達原來的出發點。但是這個類比的封閉型宇宙與地球之間有一個相當重要的差異，地球的二維表面會在三維空間上表現出曲率。但是對於封閉型宇宙來說，沒有多餘的空間維度可以讓封閉型宇宙的空間藉以彎曲。封閉型宇宙的彎曲情形無法以視覺形式表達，就算是理論科學家都做不到這一點。他們唯有透過愛因斯坦方程式，才能瞭解多維空間裡的情形。

如果封閉型宇宙真有形狀可言的話，大概可以類比成球型。而開放型宇宙則類似於鞍型。鞍型在某個角度呈現上升趨勢，同時會在另一個角度上表現出下降的趨勢，如果上升的曲率與下降的曲率相同的話，這兩個角度的端點永遠不會相交。因此，開放型宇宙是無限的。這種空間具備負的曲率。

另外一個可能是宇宙的密度剛好等於臨界值，而空間平均曲率為零。這種宇宙可以比擬成一塊平坦的平面，平面的各個方向延伸到無限大。像開放型宇宙一樣，平坦型宇宙是無限大，但在平坦型宇宙中，膨脹的速率愈來愈小，小到幾乎為零，但是也永遠不會真正變成零。

大霹靂

如果宇宙是膨脹的，在過去一定有某一個時刻，整個宇宙是一團密度極高的物質。事實上，祇要能測量出宇宙膨脹的速度，就可以估算宇宙大約是在多久以前誕生。但是要得知宇宙誕生的時間還牽涉到許多未知數。舉個例子，直到這本書寫作之時，天文學家還是無法精確測量到宇宙膨脹的速率，不同的天文學家得到不同的結論，沒有任何一個數據可以獲得所有天文學家的認同。再者，宇宙的年齡與宇宙中含有多少物質有關。如果宇宙密度很高，表示過去重力阻礙膨脹的效果很大，這也會影響到精確計算宇宙年齡的結果。但基本上，天文學家都同意宇宙年齡應當介於一百億年到兩百億年之間，所以一百五十億年應當算是不會引起爭議的數字。

證據顯示，宇宙始於一場大霹靂。大約在一百五十億年前，當大霹靂剛開始不久，宇宙還是一團極其光亮、熾熱的大火球，其中充滿著高速移動的次原子粒子。有三個重要證據支持這一點：一、先前已經提及的宇宙膨脹，二、宇宙背景輻射(cosmic microwave background)的存在。在一九六四年，兩位貝爾實驗室科學家潘佳斯(Arno Penzias, 1933-)與威爾森(Robert Wilson, 1936-)發現太空中充滿著一種奇怪的輻射。這種輻射由

位於光譜微波區的無線電波所組成，而且相當類似於在絕對溫度三度時的黑體輻射。

當兩位貝爾實驗室科學家發現這件事後，科學家便不斷地以精確度越來越高的儀器來測量這些背景微波。現在已經知道這些背景微波相當於絕對溫度二點七五度下的黑體輻射，而且與季節或時間無關。黑體輻射會在不同的溫度下，表現出不同的頻率。天文學家也發現在天空中的某處背景微波的強度會稍強，這是因為地球與銀河的運動所致。

當物理學家觀察到黑體輻射之後，科學家便可以實際觀察到原始宇宙這顆大火球。科學家所觀測到的是無線電波而不是光，理由是這些電磁輻射早在一百五十億年間就已經發射出來，由於時間太過久遠，因此可見光都已經紅位移成波長較長的無線電波。另外一個描述這種現象的說法是，由於宇宙膨脹，所以這些可見光便被拉長成無線電波。當宇宙越來越大，波峰與波峰之間的距離也被拉長，因此才會觀察到無線電波，而不是可見光。

這正是歐柏悖論的解答（第三章討論過）。當科學家望向天空的任何一個方向，他們都會看到「光」，但是這些光經過幾十億年的旅行之後，已經變得越來越黯淡，因此現在所看到的祇不過是一些若有似無的光點而

已。

最後，背景輻射微波在宇宙中可以被普遍觀察到的原因，是因為宇宙中沒有地方可以免於大霹靂的衝擊。如果將大霹靂想像成一次大爆炸，其中的物質都急速向外奔飛，然後逐漸充滿本來就存在的空間，那就錯了。因為在大霹靂之外，並沒有其他的空間，過去的宇宙比現在要小得多，但是在宇宙之外一無所有，也不存在空間與時間，因此也沒有邊界可言。我們正生存在大霹靂之後所創造出來的宇宙，這個空間正在不斷膨脹中。

測量氦氣

第三個明顯指出一百五十億年前，有次大霹靂的證據，就是宇宙中大約有百分之二十五的重量來自氦氣，其他的部分則以氫氣為主，而一些在地球上常見的元素如碳、氧、矽、鐵等，祇佔宇宙重量的一小部分。我們可以這樣說，我們這個行星與生物體祇不過是由一些宇宙中的雜質所構成。

在宇宙中，氫氣與氦氣的含量並不因為區域的不同而有太大的差別。恆星中有百分之二十五的氦氣，天文學家在年輕的恆星、年老的恆星以及其他如類星體(quasar)等會發出耀眼光亮的天體中，都得到相近的結論，

星際氣體所構成的星雲中的氦氣比例，也差不多是百分之二十五。在宇宙射線中，也可以找到氦氣。在宇宙射線中，也可找到氦氣。宇宙射線主要是由質子所組成以及一些重原子核。當天文學家深入研究宇宙射線時，他們發現其中的氦氣比例和其他天體相近。

要解釋宇宙中，何以存在這麼多的氦氣也不是件困難的事。氫氣中祇有一個質子與一個電子，都是構成物質的基本粒子；氦氣還比較複雜一些，氦氣的原子核中有兩個中子與兩個質子，要解釋何以有多達百分之二十五的氦氣存在，就要瞭解這麼多氦氣是如何形成的。

在恆星中，氫氣被轉化成氦氣，將氫氣當作燃料，進行核融合以產生光與熱。這些氫氣進行核融合之後的產物有許多種，其中最普遍的就是將四個質子融合成一個氦核，這是一個多步驟反應，和氫彈爆炸的原理相當接近。氦原子核包括兩個質子和兩個中子。質子則是本來就有的，中子從何處來呢?原來在適當的環境下，質子會進行一個核子反應，產生一個中子和一個正電子，這個反應恰巧與貝塔衰變相反。貝塔衰變是將一個中子衰變成一個電子與一個正電子，而祇要提供適當的因素，例如能量與電荷，質子與中子之間就可以轉換。

天文學家有能力計算出在這一百五十億年間，有多少氫氣被轉換成氦

氣。計算結果顯示，氦氣應當少於觀察所得的百分之二十五，這讓天文學家不得不接受氦氣還有其他的生成機制。

在大霹靂的環境下，很容易生成氦氣。計算結果指出，宇宙出現的第一分鐘內，宇宙溫度極高，氦核不可能存在，就算有任何氦核存在，也會由於其他粒子的激烈碰撞結果而被打碎。但是過了一分鐘後，宇宙的溫度降到容許氦氣存在的程度，碰撞仍舊不斷發生，但是已經不那麼激烈了，因為次原子粒子的能量已經不那樣高。當宇宙繼續膨脹時，溫度降得更低，物質開始散開，氦氣的生成速度也降低，終於逐漸停止。

必須承認的是，這樣的論證方式有一點自我循環的成分。必須先假設有一次大霹靂，氦氣才有機會形成，反過來，這又證明了大霹靂真的曾經發生過。即便如此，大霹靂的假設仍舊為氦氣的豐富含量提供了一個相當具有說服力的論證，而且也沒有其他理論可以說明何以氦氣可以達到百分之二十五的含量。另外還有一個例子可以強化解釋大霹靂存在的假設。氘(deuterium)是氫氣的同位素。在宇宙中約占百萬分之十五的重量。氘的存在之所以如此重要，是因為恆星的核融合反應無法生成氘，祇有在非常特別的狀態下，才有可能生成，比如說像大霹靂假設中所描述的環境。

氘元素中包含一個質子與一個中子，因為氘與氫的化學性質相當接

近，所以才稱氘為氫的同位素，因為這兩者都具備一個電子繞著帶有一個正電的原子核運行。由於在氘核中，質子與中子之間的鍵結力非常微弱，就算在恆星核反應中會生成氘，也是一生成之後，立刻消失，因為在附近祇要有一個高能量的粒子就能把這種微弱的鍵結打破。從另一個角度來說，在大霹靂中很輕易地生成少量氘，大約在同一時間氦亦形成。在大霹靂的劇烈環境中，一次可以生成大量的氘，即便同時存在高能粒子也無法同時將所有的氘打斷因此就能讓少數氘倖存至今。

宇宙最終的命運

所有的證據都指向大霹靂，但是這並無法解答我們對於未來的疑問。如果宇宙是開放的，宇宙將會永遠膨脹下去，然後在數十億年之後，這些目前仍在發光的恆星都將一一熄滅，場陷成為黑洞。會有一段時間，宇宙中將會充滿足夠的氣體以生成全新的星球，但是這些氣體總會耗盡，然後整個宇宙終將變成一個漆黑而沒有生氣的陰冷空間。然而，宇宙還是不斷擴張，讓這些死寂的星體距離越來越遠。

從另一個角度來說，如果宇宙是封閉的，膨脹的過程總有一天將會停止，然後開始收縮。一旦收縮的過程開始，重力的影響將會越來越顯著，

而讓收縮的過程越來越快，使得宇宙到最後場陷於一場「大崩墜」。封閉型宇宙必然會走到這個結局。

平坦宇宙的可能性可以被忽略，宇宙成為平坦型態的可能性是零，因為宇宙密度可以是任意值，要恰好等於臨界值的機會絕無僅有。如果，我說萬一如果宇宙真是平坦的話，其命運和開放型宇宙類似。唯一的差別就是宇宙膨脹的速率會越來越慢，最後將會慢到幾乎看不出來。

由於宇宙已經很明顯地不是開放型就是封閉型，科學家想盡辦法想要瞭解我們的宇宙到底具備何種性質。當愛因斯坦在一九一七年發表靜態宇宙論點時，他假設宇宙是封閉的。當時並沒有任何證據可以支持這個假設，愛因斯坦如此假設是基於美學的考量。另外，愛因斯坦做這個假設可以避免「無限大」的困擾。

哈伯是第一個試圖以實證方式解決這個問題的人。他推論說如果宇宙是封閉的，星系的數目要比開放型宇宙的星系數目少。在一九三〇年代早期，哈伯開始計算銀河系的數目，不幸的是，他似乎太急著做出「宇宙是封閉型態」的結論，所根據的乃是他發現紅位移數據有少量的差別。今日的科學家都同意，哈伯其實什麼也沒有證明出來。

當天文學家試圖進一步改善哈伯的計算時，越來越明顯的證據顯示，

幾乎不可能單憑天文觀察就能得出結論。觀察遠方星系時，存在太多變數，而且也無法直接得知宇宙密度的數值。一九三三年初，天文學家已經發現宇宙中包含太多不發光的物質。那一年，加州理工學院的天文學家蘇維奇(Fritz Zwicky)發現在后髮座(Coma Berenices)中的一個大星團，彼此間似乎以引力相吸在一起。但這些星系的質量還不足以將彼此結合在一起，以蘇維奇的話說，其中有一些「失蹤的質量」(missing mass)。以現代術語來說，在這些星系間存在著黑暗物質(dark matter)。正如字面所指出的，黑暗物質就是一些原本應當存在，卻無法被天文學家所觀測到的星際物質。在這裡，「黑暗」意味著「無法被看到」(invisible)。黑暗物質根本不會發光或是放出任何可被觀測到的電磁輻射。

開放型宇宙理論中的大漏洞

在一九七四年，有四位美國天文學家葛特三世(J.Richard Gott III)、岡恩(James Gunn)雪瑞(David Schramm)和提斯尼(Beatrice Tinsley)，宣稱他們發現開放型宇宙的證據。他們計算氘的含量，而得)到這個結論。他們認為，宇宙中的氘含量與當初大霹靂時創造出來的物質密度成正比。如果可以知道當時的物質密度，就可以得知今日的物質密度，這

個數字要比臨界值要小許多。

自一九七四年以來，這個計算不斷被改進，同時也用來計算其他輕元素的同位素含量，例如氦三元素（這是因為氦三元素的原子核中包含三個粒子：一個中子與兩個質子）以及鋰六元素。這些實驗的結果都指出宇宙密度不高於臨界值的百分之六。

現代科學家並不太相信這些計算的結果。計算輕同位素的結果，祇告訴我們在宇宙中有多少重子(baryon)粒子而已，(重子是某類基本粒子的統稱，包括質子、中子等這類粒子，都具有強作用力，而且質量較重，比質子與中子重。）重子中的質子和中子是組成宇宙的主要基本粒子，當然還有不屬重子族的電子，它不具備強作用力，而且其質量太輕，對宇宙密度影響不大。

這個理論無法計算出在大霹靂中會有多少其他類粒子形成，又會有多少粒子存留至今。這些粒子包括已經被發現的粒子，以及僅在實驗室中合成但尚未實際觀察到的粒子。沒有理由將這些非重子粒子全部列為與宇宙密度無關的因素。如果把這些非重子的粒子包括進去，宇宙說不定會是封閉的。

另外一個為科學家所接受的事實是：宇宙間存在著大量看不到的物

質。至少百分之九十以上，很可能是百分之九十九的宇宙空間中，充滿黑暗物質，這些黑暗物質以各式各樣的形式存在。科學家認為漩渦星系以及我們銀河系都為黑暗物質所包圍。沒有人知道這些黑暗物質是什麼東西，但是黑暗物質的確存在，因為這樣才能解釋星團間彼此強大的重力效應。觀測結果還無法確認這些具備質量的黑暗物質是否會導致宇宙封閉，但也無法否定有這種可能性。

沒有人知道，也找不到答案

如果現行宇宙論正確的話，宇宙正好介於開放與封閉之間，以至於我們可能永遠都無法確定其真正屬性。在一九八〇年，美國物理學家顧斯(Alan Guth)提出暴脹宇宙論(inflationary universe theory)。根據顧斯的說法，在宇宙誕生後的幾分之一秒內，曾經經歷過一次極端快速的「暴脹」，在大約祇有10^{-32}秒的短暫時間中，宇宙的體積暴脹了10^{50}倍之多。這次暴脹的時間大約是在宇宙誕生後約10^{-32}秒，然後幾乎馬上結束，繼之以緩慢的膨脹。

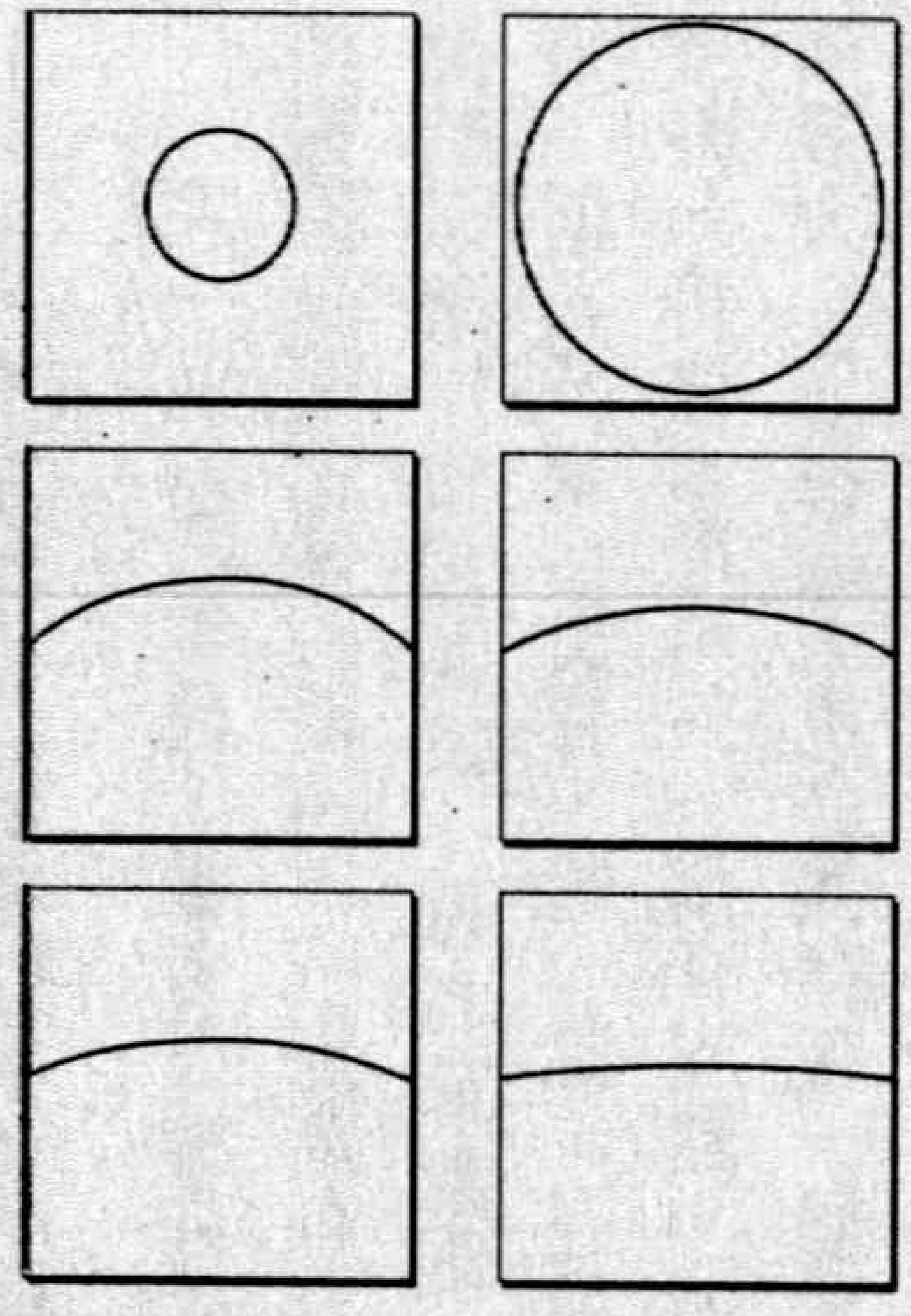
對於一般人來說，很難想像發生在宇宙誕生後第10^{-32}秒的事件，但是祇要對愛因斯坦的廣義相對論有信心的話，人們的確能夠探討最初宇宙的

活動。事實上，廣義相對論還可以追溯到更早，但是想要知道比 10^{-33} 秒更早之前所發生的事，便需要運用量子重力理論（theory of quantum gravity）。我並不打算在這裡詳細討論暴脹宇宙論，有興趣進一步研究的讀者可以參酌我的另外一本著作《宇宙問題》（*Cosmic Questions*），其中也對黑暗物質做了更進一步的討論。但是我還是要提示兩點：一、暴脹宇宙論似乎是目前唯一可以解釋宇宙現在擁有某些特質的理論；二、許多物理學家相信在宇宙誕生初期的環境，宇宙以某種方式暴脹是不可避免的。存在於原始宇宙的量子場曾經產生過無以倫比的巨大向外斥力。換言之，在此一時期中，曾有一段極為短暫的時間存在著愛因斯坦所說的宇宙常數。

對於暴脹宇宙論，我僅舉出一個例子來說明何以宇宙呈現目前的面貌。請注意宇宙背景微波的均一性非常高，不論從哪一個方向來測量都是一樣的強度。這些背景微波出現於宇宙誕生之後的三十萬年時，換句話說，這些背景微波已經在宇宙中旅行了一百五十億年，所以當我們望著天空相反方向的星空時，兩者間的距離就有三百億光年之遙，但是為什麼相隔三百億光年遠的背景微波會如此相像，除了暴脹理論外，沒有其他理論可以說明這一點。

從另一個角度來說，如果真的曾經發生過暴脹，那現在我們所看到的

任何事物當年都集中在一塊極小的空間之中。今天這些相隔極遠的星球可能曾經互相接觸過。



當具備曲率的物質膨脹時，表面將會變得越來越平坦。上圖正是一個球體膨脹的過程，下面四個圖祇展示球體的一小部分。人們相信，在大霹靂之後，宇宙曾在極短的時間內經歷過一次劇烈的暴脹，由於這次暴脹相當激烈，以至於將整個宇宙的平均曲率張成幾乎為零。

暴脹宇宙論是屬於幾乎不可能被證明的理論。事實上，當初設計暴脹宇宙論的用意就是要解釋宇宙何以呈現目前面貌，它沒有產生任何可檢驗的預測。然而也沒有其他理論可以像暴脹宇宙論這樣成功地解釋大部分的現象，目前科學家提不出其他非暴脹的理論，足以解釋宇宙間種種性質。

如果暴脹宇宙論是正確的，那麼宇宙必然接近平坦，這個理論預測宇

宙介乎開放與封閉之間，以至於根本無法判定。因為暴脹的結果將如圖九所示一般，將宇宙「撐平」到平均曲率接近於零的程度。有如將氣球吹大，其表面將愈來愈平坦，當然氣球通常祇能膨脹一、二十倍左右，而我們的宇宙卻能膨脹 10^{50} 倍之鉅。由於宇宙的體積實在太大，以至於觀察者無法分辨出到底我們的宇宙是彎曲或平坦的。

大霹靂奇異點與虛時間

在一九六〇年代，霍金與潘洛斯證明了一連串的理論以說明如果廣義相對論是個正確的理論，一定會有一個大霹靂奇異點，換句話說，這個理論暗示著宇宙起源於一個具備無限大密度的狀態。如果宇宙是封閉的宇宙，則必然來自於特定的一點；在幾十億年後，當宇宙又終結於一場大崩墜時，將會出現另外一個奇異點。如果宇宙是無限的，未來也一定會繼續無限大，但在過去也必然存在一個大霹靂的奇異點在宇宙一開始時所有的事物都被壓縮在這一點上。

霍金與潘洛斯一開始就假設廣義相對論必然正確，但是在奇異點上，廣義相對論將會失效，在這一點上，與黑洞中的奇異點極其相似。因此在宇宙開始之初，宇宙要嘛就壓縮在一個貨真價實的奇異點上，要嘛在一個

非常非常小的地方。

雖然沒有人知道量子重力理論是不是可以用來說明大霹靂奇異點的存在，但仍然值得進一步探究這個大霹靂奇異點是否可以避免。因為物理定律在奇異點中都會失效，如果理論證明真有奇異點存在，那麼我們永遠不能問「奇異點之前曾發生過什麼事」，也無法描述宇宙是怎樣產生的。因為一旦有了大霹靂奇異點，就無所謂在大霹靂之前這回事，也不可能問「時間與空間是否在大霹靂時，就存在了？」這類問題。

霍金和美國物理學家哈特（James Hartle）發現可以避免大霹靂奇異點的方法，他們的假設並沒有任何明顯的實證證據可以支持，而霍金也很小心地強調這個想法祇不過是一個「提議（proposal）」而已。換句話說，霍金和哈特所形容的祇不過是宇宙起源的可能之一。

霍金在他的《時間簡史》(*A Brief History of Time*)中，討論到這個「提議」，他以「虛時間」（imaginary time）來說明。這裡必須強調的是，所謂的「虛」是取其技術上，或是數學上的意義，和我們所經歷的時間沒有什麼差別。

虛時間的數學意義與虛數(imaginary number)有關，數學家對虛數的研究起於十六世紀，當時數學家想瞭解像是$\sqrt{-4}$這一類的數字有何意義。-4

的平方根絕對不會等於任何正數或負數，因為任何正數或負數的平方一定是正數，所以數學家發明了虛數 i 用來處理這種情形，並將虛數 i 定義為 -1 的平方根，或說是 i 的平方等於 -1。在這樣的數字系統下，$\sqrt{-4}$ 將等於 2i，虛數和實數一樣可以進行四則運算，也可以和實數相加減，所得到的結果稱為複數(complex number)，例如 $\sqrt{4}+\sqrt{-4}$ 是 2+2i。虛數的發明並不全然是因為數學上的好奇心，在工程學與物理學上大量用到複數，例如薛丁格的波函數就必須引用複數，這也是在波函數中祇有波幅的絕對值平方才有物理涵意。

虛數在平方之後便會消失，但是在霍金—哈特理論中，虛時間不會消失，反而被賦予物理意義。當時間變成「虛數」之後，將會表現出與空間維度一樣的特質。根據霍金—哈特理論，當回溯時間超過一定的程度，時間軸將會變成一條「假設」的軸。換句話說，如果試圖觀察在宇宙之前的歷史時，時間將不再成為一般意義的時間，而成為類似空間的事物。現在我們所處的世界中有三維的空間和一維的時間，但在霍金—哈特理論，宇宙一開始祇有四維的空間。

霍金—哈特理論不會有奇異點，因為沒辦法回溯到時間為零的那一時刻。早在那之前，時間已經轉變成空間。在這個理論中，宇宙沒有起源，

所謂的「起源」，意味著在時間流中發生的一個事件，但霍金與哈特說原本並不存在時間。

霍金—哈特理論同時暗示著這個宇宙是封閉的，但卻不會有終點。當宇宙終結於一次大崩墜，時間又會變成虛數，而變成另外一個空間維度。沒有人知道他們的說法是否正確，他們自己也指出這個說法僅僅具備理論上的可能性。但是這個理論卻可以避免處理大霹靂奇異點的問題。在這個大霹靂奇異點上，物質、時間、空間，均受到無限大程度的壓縮，同時所有的物理定律都不適用。

建構的理論與瘋狂的推測

虛時間理論也解釋了物體落入黑洞奇異點時，可能發生的狀況。根據霍金的說法，這些粒子將會歷經整個虛時間，而回到「兒時宇宙」(baby universe)，那是一個微小而自我封閉的時空，和宇宙相似，但是由於其中祇存在著那些被吸進黑洞的物質，因此將會比宇宙要小得多。如果霍金的「兒時宇宙」存在的話，將會與我們的宇宙進行短暫的連結，在某些點上，這些「兒時宇宙」將會自行重新連結。在此一情形下，這些「兒時宇宙」看起來就像黑洞。

對於討論到大霹靂、暴脹宇宙論，或者像是霍金的虛時間一類的書籍，通常給人的印象就是這些理論都建築在一樣的基礎上。事實上，在這一章中所討論的種種想法中，有一些是充分建構的理論，也有一些是瘋狂的推測，因此有些很可能是正確的，有些則未必。例如，英國天文學家羅賓生（Michael Rowan-Robinson）曾經估計過各種宇宙學理論的正確性，他認為大霹靂理論自大霹靂之後一秒起有百分之九九以上的正確性。但他認為暴脹宇宙論祇有百分之三十的機率，超弦理論祇有百分之十的正確性，至於虛時間理論祇有百分之一的機率成真。

羅賓生的估計相當保守。我認為猜多數的宇宙學家會同意暴脹宇宙論的正確可能性超過百分之三十。有些理論已達共識，例如沒有人懷疑大霹靂的真實性，這個理論普遍認為已經建構成熟，而大部分的科學家都相信大霹靂可以解釋宇宙誕生後一秒內所發生的事情。同樣的，大部分的科學家也會認為霍金-哈特理論祇是一種猜測，而暴脹理論則是介乎兩者之間。

第十章

無限多個世界

INFINITE WORLDS

在布努諾的時代裡，談到無限多個世界無異於承認自己是異教徒，到了今天，科學家經常提到存在無限多個世界的可能性。關於這個主題存在著變奏曲，其中一個說法的根據是這樣的：如果大霹靂曾經發生過一次，為什麼大霹靂不能發生許多次，甚至無限多次？另外一個說法則根基於量子力學：如果宇宙可以被視為是個量子力學的系統，就必須假設存在著無限多個世界，每個世界被賦予各種不同的機率。因此，在某個意義上，任何事物都有存在的可能。也有理論認為宇宙可以經過一種稱做「萌芽」（budding）的過程而不斷自行複製。宇宙的確有可能誕生出小型的時空泡泡，從原來的宇宙中脫離後，自行進行暴脹，形成另一個宇宙。

老實說，上面這些說法都祇是推測之詞，但是如同實驗與觀察一般，推測也是科學研究的重要方法之一。當我們能確認何者為真之前，我們得先發現有哪些可能為真。以宇宙發生論來說，如果理論合理，而且允許其他宇宙存在的話，我們便已經向真實又推進一步，即便這一個其他的宇宙永遠觀察不到。

如果真有其他宇宙存在，也不可能指出這些宇宙的位置。「位置」意味著空間中的某一點，而我們所能觀察的任何一點都侷限在我們自己的宇宙之中，然而，其他的宇宙也不無可能以微蟲洞與我們的宇宙相連結。如

果真有此事，那麼這些微蟲洞將會對我們的宇宙造成特定的影響，而其他的宇宙也將被推論其存在。正如同虛粒子被推論應當存在那樣一樣。其他宇宙是否存在固然祇是一種推測，但這個推測並非全然無聊。我們稍後將會看到「交錯的宇宙」的相關理論將會對科學知識有著正面的影響。

一片虛無的宇宙

如果暴脹宇宙論沒錯，我們的宇宙一開始時可能僅擁有極少量的物質，或者什麼都沒有。而大部分的質量都在暴脹的過程中才被創造出來。當宇宙在短時間內急遽膨脹時，物質與能量將會被吸入而充滿整個宇宙內部，這種事情發生的唯一解釋是，宇宙間充滿負的能量，可以和這些正的質量相平衡，根據愛因斯坦的質能互換定理，宇宙的總能量和為零。

在宇宙中存在著許多不同形式的能量，重力能量是其中含量最豐富的一種，而重力能量永遠為負。為了瞭解這件事，可以先從彗星著手。彗星與太陽的距離甚遠，感受到的引力相當有限，幾乎為零。因此，當彗星開始位於離太陽很遠時，彗星與太陽的重力能量為零。假設一開始有某種力量使得彗星開始向太陽移動，當彗星越來越接近太陽的時候，速度將會越來越快，而將獲得動能，但是能量不會平白無故出現，彗星可以得到動能

的原因是因為重力位能不斷轉換成動能的結果。如果一開始的能量總和為零，如此一來，當彗星越接近太陽，重力位能將變成負數（即小於0），而且會越來越小。

我們也可以反過來觀察這件事：假設我們希望向其他星系發射探險太空船，一開始時一定要賦予太空船能量，以讓太空船能脫離太陽系，由於當太空船越遠離太陽，重力位能越趨近於零，一開始時的重力位能必然為負值。

任何成對存在的天體，無論是衛星、行星、恆星，乃至於星團、星系、銀河系，都具備負值的能量，如果兩者間的距離已經遠到無法感受到彼此的萬有引力，重力位能將會等於零。但是如果兩者間的距離近到可以彼此感應重力，其能量將為負，而且負能量的總值將會達到無限大的程度，我們無法忽略銀河系的吸引力，正是這些吸引力讓宇宙膨脹的速度減緩。

萬物皆始於無

第一位認為我們的宇宙始於一片虛無的人是美國物理學家崔翁（Edward Tryon），他在一九六九年提出這個概念。他認為宇宙之始，幾

乎不存在質量或是能量，他也認為就算宇宙來自於無，也無損於物理定律的正確性。在崔翁發表理論之後，就有許多相似的變形理論出現。根據四個比利時物理學家的看法，宇宙起源於一對粒子與反粒子。另外的理論則認為，宇宙的起源是許多空間維度，但是其中並不存在任何物質。大霹靂則來自於宇宙突然「結晶」成現在的形式。換句話說，許多空間維度突然一同自發地發生了一個事件，並造就了現有的宇宙。雖然這些假設看起來都大異其趣，但是都有個共同點，就是認為大霹靂起源於某個特定事件。這個特定事件有可能是在量子力學支配下所發生的隨機事件。或者像是崔翁說的，「我們的宇宙祇不過是一再發生的事件之一而已。」

塔夫斯大學（Univ. of Tufts）的物理學家維能金（Alexander Vilenkin）仔細研究「無中生宇宙」的理論。他認為宇宙誕生的過程與虛粒子誕生的過程相接近。量子波動（quantum fluctuation）可能導致微小的時空泡泡的生成，其中大部分局才出現便消失了，但是有些膨脹中的時空泡泡會捲入暴脹的過程中，如果發生了這種狀況，一個五臟俱全的宇宙便於焉生成。

如果維能金的想法是正確的，崔翁的想法就必須修正為新宇宙不斷產生。如此一來，人類便有可能以人工方式製造宇宙的。要如何完成這一點

是個大問題，因為可能永遠無法觀察這些宇宙，但是和製造時間機器，或是製造均質的微小蟲洞，然後再將之撐開，並避免蟲洞塌陷等工程相比較，製造宇宙反而是件相對簡單的事，從這角度來看，我們的宇宙說不定是某個其他宇宙人大一物理實驗的一部分。

如果還有其他宇宙，這些宇宙在那裡？唯一可能的答案就是，「可能不存在，也可能到處都是」，由於我們的宇宙沒有邊界，因此也不可能有任何事物存在於宇宙「之外」，即便是有限的封閉宇宙都沒有邊界。如果有其他宇宙存在，他們不會存在於時間或空間之中，至少不在我們的時間與空間之中，這些宇宙很可能是「交錯」（alternate）的宇宙。

無盡地暴脹

沒有人真的知道在我們所提及過的所有宇宙發生論之中，到底那個才是真的。新生的宇宙可能祇有 10^{-33} 公分或甚至更小，現在的物理學還無法處理在這種微小世界裡發生的事件。我也一再強調科學家完全不知道在這種尺寸下的世界空間與時間的觀念是不是還能適用。除非量子重力理論發展出來，否則我們根本不可能猜中在這個極度微小的世界裡，事情是如何進行的。唯一我們確定的，這許許多多的理論，都不曾和已知的科學現

象相衝突。但這也許因為在這些地方，科學家知道的事實還太少。

暴脹宇宙論的基本觀念非常簡單，目前在粒子物理中的理論預測還有許多尚未被發現的粒子存在，觀測不到的原因在於現有的粒子加速器的威力還不夠大。如果這些粒子真的存在，這些粒子的量子場將會產生極高的能量密度，而這可能正是原始宇宙暴脹的動力。暴脹之後，量子場的強度減弱，使得宇宙在短時間內便停止暴脹。

然而，蘇裔美籍物理學家林第（Andri Linde）卻認為假設暴脹祇發生過一次實在太不合常理了。初期宇宙的量子漲落（Quantum Fluctuation）將會導致各區域量子場強度不一，在某些區域中，量子場會彼此重疊，使得量子場的能量密度高到產生足以引發暴脹，同時在其他區域，量子場卻可能相對較虛弱，使得宇宙各區域暴脹的程度不一。如果這是真的，宇宙中將充滿彼此差異甚大的區域。假若林第的混沌暴脹論（chaotic inflation）可以成立，我們不太可能有機會觀測到宇宙的其他區域，宇宙暴脹使得我們身處的這塊區域可能比能觀測的宇宙空間還大，因為由於宇宙祇有一百五十億歲，我們無法看到一百五十億光年以外的世界，如果真是這樣，我們以及我們的子孫可能都看不到我們這塊區域的邊界。

如果林第的理論祇有這樣，那麼也沒有什麼耐人尋味的地方，事實上，除了說明宇宙比我們所能觀測的還要大，以及其中充滿性質各異的區域，而且這些區域是我們所無法觀察到的之外，林第還舉出了許多有趣的觀點。林第指出，宇宙有能力一再自我複製。在宇宙的某些區域之中，微觀世界的量子漲落將會使得量子場的強度不斷變強，直到在微觀世界的時空泡泡中引發暴脹。這種機會不大，但是仍有可能，而且如果新的暴脹發生之後，有可能製造出新的宇宙。但是我們將無法看到這些新宇宙，因為這些宇宙是從現有的宇宙中再「發芽」出來的新生宇宙，有屬於自己的時空結構。這和維能金的假說不同，維能金認為宇宙來自於全無，而林第認為在新宇宙出現前，已經有另一個宇宙存在。

林第將他的理論比喻成「無盡的暴脹」因為宇宙中不斷有新的暴脹發生，造成新的宇宙，其中又將出現個別獨立的暴脹。如果我們的宇宙中容許新生的時空泡泡存在，那麼在這些後來暴脹成新宇宙的時空泡泡中，又會有新的時空泡泡出現。完全沒有理由認為我們的宇宙就必然是第一個宇宙，說不定在我們之前，已經有數不清多少個宇宙，而我們祇是宇宙上偶然出現的芽苞上的小點而已。

我們無法預測其他的宇宙與我們的宇宙是否全然類似，也沒有任何特

定的理由使得物理定律可以放諸不同宇宙而不變。在暴脹剛出現時，所有宇宙面臨的物理狀況都一樣，但是當能量下降時，物理定律可能就會有種種變形，林第說，如此一來，也有可能出現極強大的量子漲落使得宇宙的時間與空間的維數都可能變化。

為何我們的宇宙如此適合生命生存？

乍看之下，林第的理論幾乎等於科幻小說，不斷提到無限多的宇宙、無限多的時空結構、不同形式的物理定律等。在他提到的宇宙中，大部分的宇宙的物理定律可能和我們熟悉的不同，這些宇宙的時間與空間維數也不相同，有這宇宙甚至不存在時間的維數。這樣的景象有可能存在嗎？

我們可能永遠無法知道真正的答案，但是，至少林第的理論解決了一個原本極為困難的問題：為什麼我們的宇宙如此適於生命存在？生命的存在似乎建立在一連串幾乎不可能的巧合之上，舉個例子來說，如果物理定律祇要有一點點的改變，生命也許就不存在了。

譬如，在我們的宇宙中，中子大約比質子的質量重上千分之一，如此一來，自由中子將會自發性地衰變成一個質子與一個電子。反過來，如果質子比中子重的話，中子將會是比較穩定的粒子，此時，衰變的將會是質

子，質子衰變成一個中子與一個正電子，這些正電子則會被電子所殲滅，到最後，宇宙中除了中子外，幾乎沒有其他的粒子，而在中子之外，祇剩下正電子與電子反應後剩下的大量伽瑪射線。

如果生命能在宇宙發生，並且繁衍，四個基本力（強力、弱力、電磁力、重力）間必須達到精確的平衡。舉例來說，如果重力不那麼強，那麼宇宙初誕生時的太初混沌（Primordial）中氫氣與氦氣的雲層將不可能凝成恆星。更且，較弱的重力也讓膨脹中的宇宙減緩速度變慢，使得這些氫氣與氦氣將來不及形成星球而散失在無垠的宇宙中；反過來，如果重力更強些，可能生命還來不及出現，整個宇宙就已經毀在大崩墜之中，就算宇宙還能倖存，星球將更容易坍塌成為中子星或是黑洞，生命一樣無法出現。

如果將原子與分子聯繫在一起的電磁力減弱，固體與液體將不在存在，整個宇宙中除了氣體之外，一無所有；如果電磁力太強，將會出現災難性的結果，質子間強烈的斥力將會使得元素的原子核變得比較不穩定，或是充滿輻射性，如此一來，氧氣可能具有輻射性，鐵原子則會輕易地分裂，在這樣的環境下，恐怕沒有任何生命可以生存。

不僅自然力的強度重要，各自然力強度的比例如何也是相當重要的

因素。例如，祇要電磁力稍強一點，原子核將容易分裂，甚至除了單質子的氫原子外，其他元素的原子核都不可能穩定存在。祇要有一種力稍微改變一下，所有的事物都將因此而有巨大的改變，事實上，在檢驗過林第理論中眾多宇宙的性質之後，物理學家發現，大部分的宇宙都不適於生命體存在，有些宇宙是由百分百的氫氣或氦氣所組成，另外在某些宇宙中星球一出現就因為強大的重力而被摧毀，還有些宇宙，其中星球根本一開始就不會出現，從輻射線到黑洞，絕大部分的宇宙中都是一片死寂。

高度複雜的生命

從空間維度的觀念上也可以看到這一點，如果我們的宇宙不是剛好有三個空間維度，生命可能從來無法存在。如果不是三度空間，星球運行的軌道將會不穩定，而穩定的運行正是生命存在的必要條件。如果宇宙不是三度空間，太陽系的行星將會向太陽迴旋掉落，而銀河系中的所有星球都將以迴旋軌道落向銀河系的中心，最後則成為一個無法想像的巨大黑洞。

如果要讓生命發生或存在，所有的巧合都必須以極其複雜的方式同

時存在，例如，碳以及其他構成生命基本元素的出現都是巧合之下的產物，如果，這些元素的原子核不是剛好具備特定的物化性質，這些元素可能無法自然存在，就算能夠出現，數量也會很有限。

大霹靂的結果祇出現了氫、氦以及少量的相關同位素，例如氘、鋰。其他元素全都來自於這些較輕原子在恆星內部進行核反應的結果。當這些恆星爆發成超新星時，其中的氧、氮、碳、鐵等元素被釋放到宇宙中。所以有人將生物體形容成星際灰塵的組合品，這真是個非常貼切的說法。

原子核的誕生是一連串反應步驟組合的結果，先出現較輕的元素，再由這些元素組成較重的元素，例如，當碳原子與阿爾發粒子反應，將出現氧原子核，碳有六個質子與六個中子，阿爾發粒子則有兩個質子與兩個中子，兩者進行有效碰撞之後，將會出現具備八個質子與八個中子的氧，如果碳或氧得到更多質子，也會形成更重的元素。

一般而言，由阿爾發粒子或是氦原子核所組合而成的元素會比較穩定，碳和氧就是很好的例子。碳原子核具備十二個粒子，恰好相當於三個阿爾發粒子，同樣的氧則相當於四個阿爾發粒子，由於這些原子核特別穩定，因而在元素的合成上扮演相當重要的角色。特別要說的是，如果以恆星內部的環境都無法輕易地產生碳，無論是碳，或是更重的元素都不可能

大量存在。生命所賴以存在的重要元素，例如氧或氮都不可能存在，而像是地球一類由較重化學元素組成的行星也不可能存在了。

形成鈹元素的瓶頸

和碳、氧等由阿爾發粒子組成的穩定元素比較起來，鈹（beryllium）元素恰好是個例外。和氘相似，含有四個質子與四個中子的鈹元素，很容易被破壞，但是鈹元素卻是由組成碳的原料，阿爾發粒子與鈹做有效碰撞後將會產生碳。這實在是種奇蹟，因為類似這種碰撞通常會將鈹打碎，但事實上並非如此，而且如果元素無法忍受這種碰撞，將不可能合成更重的元素，更不會有我們在這邊思考為什麼會發生這些事了。

我們有幸存在的原因是因為自然界避開鈹元素容易破碎的瓶頸。首先我們需要先談一下核子物理。

我們曾經提過，繞行原子核的電子具有許多不同能量狀態的能階，當電子在能階中做量子跳躍時，將會吸收或放出光子，如此一來，特定元素將祇能放出或吸收特定波長的光。這些不同波長的光各自代表不同能量的光子，而這些能量恰好就是不同能階的能量差。舉個例子來說，如果在氣體中通過電流，氣體將會開始發光，再用三稜鏡分析這些光的光譜，將會

看到一些分裂開來而明暗相間的光譜，不同的元素將會有不同的組合。

原子核也具備能階，但這些能階和光譜無關，但是這些能階可以決定哪些反應可以進行，哪些則不。碳原子具備的能階恰好等於阿爾發粒子與鈹原子核碰撞時的能量，如此一來，當阿爾發粒子與鈹原子核碰撞時，將會形成碳，而不是將鈹原子核打碎。

一九五四年，英國天文學家霍伊（Fred Hoyle 1915–）指出，如果恆星想要合成更重的元素，則碳必然具備特定的能階。那時並沒有人注意到這個想法，特別是核子物理學，他們並不習慣有天文學家闖進他們的領域，但當少數物理學終於注意到霍伊指出的現象，科學家終於發現生命所以能夠在本宇宙中存在的唯一理由正是因為碳具備適當的能階。因而宇宙能合成足夠多的碳（以及更重、而且是生命所必需的其他元素）原子，才能讓行星（如地球）演化出生命體。〔按：生命體最關鍵的化學物質是碳元素。〕

水的奇妙性質

我們再來討論更複雜一些的事，自然規律中還有一些更特別的性質，使得生命的存在成為事實。例如，碳原子可以聚集成串，並形成生

命的基本分子。如果碳不這樣做，就不會形成氨基酸、蛋白質等分子，更不用說任何形式的有機生命。

自然界中有少數物質會在結凍後體積膨脹，水是一個例子。如果水不具備這個性質，地球上的海洋早就凍結起來，因為結凍的冰將會因為體積縮小，使得密度升高，而沈入海底。沈在海底深處的冰將因無法吸收太陽能而解凍，而會漸漸由下而上地將海凍結起來，整個海洋變成一塊大冰塊，將太陽放射到地表的輻射熱又反射回太空，整個地球就會變成一個冷凍的大冰球。

水還有一項特質，就是水的高比熱（special heat），和其他物質比較起來，要讓同樣份量的水溫度上升，需要更多的能量，這意味著當自然界溫度變化時，由水組成的物體改變溫度的幅度較小。換句話說，水相當於另一個穩定的因素。海洋扮演著調節地球氣候的重要角色，如果水不是具備這麼高的比熱，地球的氣候將會激烈變化，冬天像是冰庫，夏天則像是烤爐，生存的環境將會更惡劣。

水還有其他的特質，水是極其優良的溶劑，水可以溶解相當多的物質，對於有機生命來說，這是另外一個足以維生的特性。因為大部分的生化反應可以在水中進行；水也具備相當強的表面張力，這對生物細胞有所

幫助；水具備高的蒸發熱，需要比較高的溫度才能將水蒸發，這也具備了調節地球氣候的作用。

如果有其他宇宙存在，而其中具備不同的物理化學定律的話，生命體將不見得需要以碳為基礎，新陳代謝也未必需要透過水做為媒介。其實在我們的宇宙中，就可能有這種生命形式存在。然而，無論生命形式為何、在何處生存，都會有一些共通的基本因素，例如，如果生命形式的基礎是水以外的特殊物質，這種生命形式必然需要利用到這些物質的特性以進行演化及繁衍。

上帝為我們量身打造物理定律？

在十九世紀時，所謂的造物論（argument from design）相當盛行，當時的流行觀點是上帝的神能創造了自然界的奇觀以及生物的多樣性。根據造物論，萬物之所以存在並且展現多樣性，全然是因為上帝設計的結果。這樣的論點到現代已經不再流行，如今我們已經大致瞭解地球與生物演化的過程，並且不再需要藉助類似神能創造萬物的說法來解釋一切。但是當我們想到我們宇宙之所以如此適於生物生存，其中牽涉多少難以解釋的巧合，又不免會想到這個過時的論點。對於相信神存在的人來說，很難

要他相信這些巧合與神能無關。

我個人傾向於不要把宗教信仰帶進科學論述之中，然而，當我們談到要讓生命存在所需的因素以及可能有無限多個宇宙存在時，我們其實已經進入了形上學的領域，宗教思考很自然地會在此時出現。在這一類的問題上，我並不想在科學與宗教之間做出抉擇，但是，宇宙的種種巧合，不論你信不信神，其可能的涵義倒是可以加以分析。我們將發現，分析結果對這不同信仰的人竟是非常相似。

對於無神論者來說，這個宇宙的奇妙性質，正意味著有無限多的宇宙與無限多的奇妙性質，我們正是其中之一。所以無須驚奇，因為在這許多宇宙之間，祇有少數幾個宇宙具備生命。換句話說，我們之所以能夠思考這個宇宙如何特別，是因為有無限多個宇宙具備無限多的可能性，我們祇是其中之一，否則我們就不會在這裡討論宇宙如何奇妙。

而對於信仰上帝存在的人來說，這個宇宙經過特別設計以適合生命生存，但是這也不代表沒有其他宇宙存在，事實上，如果回頭想想布努諾的論點，他說必然有無限多個世界存在，而僅有一位無限的上帝創造這無限多的宇宙。我不想特意證實這個論點，但是至少在今天，主張這些言論無須冒著送上火刑台的危險。

所以，上帝是否存在的問題終將消失，無論神存在與否，我們都有很好的理由可以相信宇宙有無限多個。

量子宇宙學

絕大多數的科學家都認為量子力學是物理學中有史以來最成功的理論，幾乎所有的現代物理學都以量子力學作為基礎，而每天都有實驗證實量子力學所做的預測為真。

既然量子力學是所有現代物理學的基礎，我們不必遲疑地將量子力學引入對宇宙的討論之中。其實，在對宇宙的討論中已經有一門新的學問存在，就是量子宇宙學（quantum cosmology）。量子宇宙學家企圖瞭解宇宙剛剛誕生時的初始條件（initial condition），並且企圖從這些初始條件，推導出今日宇宙存在的種種性質。如果理論呈現的宇宙與現今的宇宙相近，這意味著對於宇宙誕生時的環境設想很可能是正確。

我們已經發現一個量子宇宙學的例子，就是霍金—哈特的虛時間理論。根據這個理論，將宇宙誕生的時間設定為虛時間，最後的結論與現有宇宙相似，即便無法證實這個理論是正確的，也讓虛時間理論較具說服力。

即便量子力學是個空前成功的理論，它仍舊是個奇怪的理論。波耳曾經指出，沒有被這個理論嚇到的人一定不瞭解這個理論。費曼則根本否認瞭解量子力學理論的可能性。他說，量子力學根本是個沒人能夠瞭解的理論，因此量子宇宙學也不會好到那裡去，虛時間理論就是一個例子。

量子力學是一個機率的理論，舉個例子來說，氫原子具備無限多個能階，電子會在那個能階存在純然是機率決定的結果，從某個角度來說，電子同時存在於所有的能階，至少理論上如此，直到做實驗，實驗儀器的介入，迫使電子選定位於某個能階。

當物理學家將量子力學引入宇宙學時，必須考慮無限多個宇宙存在的狀況，而每個宇宙都將被指定一個特定的機率。正如同原子能階一般，從某個角度來看，所有的宇宙將同時存在。和林第主張的混沌暴脹理論不同的是，各個宇宙之間多半彼此相似。在一組特定的初始狀態下所出現的宇宙，彼此之間祇有細節上的差異和星球的分布，或者像霍金所說的，宇宙間的差異祇在於瑪丹娜是否出現在柯夢波丹雜誌的封底。

霍金曾經提及宇宙之間不同的「歷史」，如同虛時間一般，他強調「歷史」一詞在技術上的意義。歷史是一組相對於詮釋量子力學的參考架構，這裡無須討論細節。無論談的是宇宙還是歷史，重點都是在於量子宇

宙學的基本概念是否正確，各式各樣的可能性都可以與我們的宇宙同時存在，或者，像是霍金說的，「我們恰好活在一個具備特定性質與細節的歷史之中，但是也會有其他的智慧生物活在另外一組歷史中，他們與我們之間的差異祇在於誰贏得了二次世界大戰以及誰又贏得熱門歌曲排行週冠軍。」

其他的量子宇宙存在嗎？如果真的存在，彼此間是否能夠有所聯繫？沒有人知道。根據蓋爾曼的說法，「那些通曉量子力學的理論家終於注意到這個有趣的問題。」看起來不但有無限多個宇宙存在，可能還有無限多個無限多宇宙存在，如果林第的混亂暴脹與量子宇宙學同時為真，那麼宇宙數目的無限多，可以有好多種不同的方式。

宇宙常數

正如我們曾見到過的，如果有其他宇宙存在，就可以解釋為什麼我們的宇宙「剛好」這麼適宜生物的生長。還可以解釋一些其他難解的問題，比如說，何以愛因斯坦的宇宙常數會趨近於零？

在第七章中，我們曾經討論過，愛因斯坦自認為將宇宙常數帶進理論之中是個大錯，現代科學家倒不這麼想。廣義相對論的普遍解其中包括這

個常數。我們現在已經知道，在暴脹膨脹期間，宇宙中充滿強大的斥力，此時宇宙常數的值相當大。

今日，宇宙常數的值被視為零，或是趨近於零，是因為科學家量不出宇宙常數的存在。否則，宇宙常數所代表的斥力將會影響遙遠距離的星系運動，這個影響效應目前尚未被觀察到。當理論計算結果指出宇宙常數值應當是很大時，觀測結果顯示並不是這麼一回事。在這裡，理論與實際之間有著相當大的落差，計算結果顯示宇宙常數的值要比天文學家觀察到的值要大上十的一百二十次方倍之多。

不要忘記，宇宙空間並不是真的一片虛空，在宇宙空間中，虛粒子不斷出現也不斷消失。在這一片空間中充滿著虛粒子與量子場，甚至還可以計算出在這些空間中，粒子活動所造成的能量變化。真的去計算真空中的自我能量（self-energy），算出來竟是非常鉅大。由於質能之間可以互換，所以這些巨大的能量便能產生巨大的重力，而這些重力並不會因為距離而受影響，反而會使得到處都充滿一樣強的重力，換句話說，這就是宇宙常數。

當愛因斯坦考慮宇宙常數的想法時，他將宇宙常數等同於斥力，但是宇宙常數可以是正值，也可以是負值，這意味著愛因斯坦所謂的力可以是

斥力也可以是引力。

真空中量子漲落產生的力將會大到使得宇宙膨脹無法突破微觀世界的尺寸，或者可以這樣說，目前已被科學家接受的理論預測，宇宙的大小將會比一個原子核的還要小。

一九八八年哈佛大學物理學家柯曼（Sidney Coleman）發表了一篇論文，標題為「為何是一無所有，而非存在些什麼?」（Why There Is Nothing Rather than Something）」，他在論文中指出，如果真有微小尺度的蟲洞把無限多個宇宙連結起來，如此一來，在這些微小蟲洞存在的短暫時間中，仍然會有一些粒子通過這些蟲洞。柯曼計算的結果指出這些粒子所產生的效應正好抵銷宇宙常數的作用。

為何質子那麼重，而電子那麼輕?

柯曼的發現對理論物理學家產生極大的激勵作用，因為柯曼首次發現其他宇宙可能存在的確切證據，無疑地，他的理論也不是沒有爭議，畢竟，柯曼的證據仍舊是高度理論性的，但是假設其他宇宙存在的作法，已經為困擾理論物理學家已久的問題之一提出解答。

質子比電子重上一八三六倍，為什麼?為什麼電子與質子具備特定的

電荷，而不是其他數字？或者總括來說，為什麼這些次原子尺寸的粒子具備這些特質？

如果有人在一九七〇年代向物理學家提出這些問題，他所得到的答案多半如此：「他們就是高興這樣！」但是一九九〇年代的物理學家的看法就有點不太一樣。他們認為除非瞭解這些次原子尺寸的粒子何以具備這些特質，例如說質量、電量等特質，否則無法完全瞭解次原子尺寸的世界。

超弦理論之所以吸引人的地方正在於超弦理論有可能為這個問題提出圓滿的解答，但是更可能的情形是，要瞭解粒子的質量、電量等特質還需要其他理論的協助。霍金認為粒子具備某些特質的原因在於這些粒子經常藉由蟲洞來回於不同宇宙之間。經常來回於不同宇宙之間的粒子會比一直留在這個宇宙的粒子要來得重，更甚者，對於電量可能也有類似的影響。

就算有微小尺寸的蟲洞存在，也無法觀察，所以如果有電子經由蟲洞跑到其他宇宙去，觀察起來像是電子突然消失了一樣，但是人們並未觀察到電子的消失，這也不違背霍金的粒子交換理論（theory of partical exchange）。根據霍金的說法，當電子離開我們的宇宙時，另外一個電子則自蟲洞中出現，所以不會有任何一個宇宙有粒子數目上的增減，祇不過是交換粒子而已。

每一個電子都完全一模一樣，無論是電量或是質量都完全相等。因此，蟲洞交換的過程無法被觀察到。以我們的觀點來看，在上個時刻有個電子存在，下個時刻這個電子仍舊存在，我們完全無法確定這是不是原來的電子。然而，如果計算能夠精確求出電子的各種性質，諸如質量與電荷量，這樣就可以進一步得到其他宇宙存在的確切證據。

當這本書還在寫作過程時，計算過程還在繼續中，我唯一可以確定的是粒子有可能經由這個途徑獲得電荷與質量，當然其他可能性一樣存在，例如，如果不同宇宙間的物理定律都不相同，粒子的電量與質量便可能純屬機運來決定其大小，未必在任何的宇宙中，質子的質量都是電子的一八三六倍。另一方面，現有的量子力學以及未來將要出現的粒子理論也可能解釋何以一八三六倍的質量比就是比其他比值來得可能。直到此時，幾乎沒人提出這種疑問，更不用說要提出不同的可能性。

無限多個宇宙

在不久之前，無限多個宇宙還是科幻小說中的情節，到了今日，一樣的事卻變成基本科學概念中的一環。正如我們所瞭解的，沒有人可以確切知道是不是有其他的宇宙存在，但是這些假設卻讓我們可以處理許多複雜

的問題。如果真有其他宇宙存在，生命依賴一連串不可思議巧合而存在的事實就比較不那麼難以想像。如果真有其他宇宙存在，就可以解釋何以宇宙常數的值趨近於零。如果真有其他宇宙存在，我們就可以解釋粒子何以具備某些特質，物理學家也就可以解釋他們研究了幾個世紀的物理定律何以如此。

第十一章
無限

INFINITY

數學符號「∞」意味著「無限」，華理斯(John Wallis)在一六五六年首次以這個符號代表無限，到了今天，「∞」已經是所有科學家與數學家都在使用的符號。

希臘文中的無限是「apeiron」，意思是「沒有邊界」。在古希臘文中，apeiron 帶有負面的意義，通常用來形容「一團混亂」，例如，apeiron常用來形容世界誕生之前的混沌狀態，根據亞里斯多德的說法，無限的事物是「不便的事物」，而不是「完美的事物」。在亞里斯多德、畢達哥拉斯（Pythagoras）、柏拉圖(Plato)的時代，沒有「無限」存在的空間。

亞里斯多德知道世上有許多事物似乎是「無限」的。例如，時間與空間可以無限延長下去，而線段可以是無限多點的集合。為了避免混亂，亞里斯多德拒絕接受有真正無限的存在，他發展出了「潛在無限」的理論，並且拒絕接受在天體圓球之外存在著一個無限的虛空的說法。

亞里斯多德與他的先驅者芝諾都同意「無限」是個大麻煩，芝諾是第一個把「無限」的問題攤出來的人，為了證明「無限」果然是個大麻煩，他認為他可以證明日常世界並不真實。現在已經不太有人接受芝諾老師帕門伊迪斯認為世界是個「不變的一」的說法，但是芝諾提出的悖論仍舊令

我們深深著迷。現代哲學家根據芝諾的悖論又發展出他們自己的新悖論，其中一個相當簡單的例子是討論到開關無限次的燈泡。根據芝諾的悖論，這牽涉到無限多次的動作，邏輯告訴我們，到了最後，燈泡開著和關著皆有可能。如果一開始將燈泡點亮，然後再將開關關掉無數次，最後燈泡將是暗的；但是如果一開始將燈泡點亮，然後再將開關關掉，再將燈泡點亮，最後燈泡將是亮的。這可以表示成這樣的數學式：

$$1-1+1-1+1-1\cdots\cdots$$

但是這個數學式將會有兩個截然不同的結果：

$$(1-1)+(1-1)+(1-1)+(1-1)\cdots\cdots=0$$

$$1+(-1+1)+(-1+1)+(-1+1)+(-1+1)+\cdots\cdots=1$$

數學家稱這種數列為發散數列，並且認為這種數列不會有真正的和。但是對現實世界的燈泡而言，如果將點亮的狀態視為1，熄滅的狀態視為0，最後的結果將會是明（1）與暗（0）同時皆存在。

對斯多噶學派的哲學家來說，接受無限的概念則不是那樣難。斯多噶學派相信世界被無限的虛空所環繞，而且時間將會不斷自我循環，歷史也將不斷重演。他們並不想知道為什麼世界是在這一片虛空中的某個特定位置，而不是另外一個位置。如果他們真的問了，他們會知道，在無限的空

間之中，強調特定的位置是沒有意義的。如果虛空不變，世界從他現在的位置被移動一定的距離，一切都將沒有改變。他們也沒有問時間的循環是如何開始的，或者時間為什麼會無止境地循環，如果他們真的問了，他們會知道，無限並不像他們所知道的那樣簡單。

伽利略知道無限宇宙的概念有些令人困惑，他的後繼者倒是認為思考這件事並不難，因為他們並不認真考慮其可能的後果。

由於牛頓並未真正的仔細思考過無限大的問題，當他試圖將影響一個星球的所有重力加總起來時，他始終得不到正確的答案，他誤以為他可以將這些力一一抵銷，如此一來，就可以解釋整個無限的宇宙何以如此穩定。牛頓也曾下過功夫研究無限小，但是他發現自己越來越迷惑。

牛頓的「無限小」凸顯了一些數學問題，而這些問題到後來也被一一解決。在數學上，無論起頭如何難，與無限有關的問題都不難解決，反過來，在物理上，出現無限的理論通常意味著在理論的某一角出現不可思議的錯誤。由於現代物理學家積極想深入瞭解自然的本質，因此科學家經常會在不同的情形下與無限相遇。在某些例子中，科學家總算成功了一小部分，例如，被稱為QED理論的量子電磁學就是一個非常成功的理論，但是卻沒有人知道QED理論在數學上是否一致而無自相矛

盾的。

QED理論將電子視為一個數學上的點，由於所有的電荷都集中在這一點上，因此這個點所攜帶的電荷密度與質量將達到無窮大，而我們所觀察到的有限電量及質量來自於電子周圍虛粒子的遮蔽效果。這個怪異的理論能被接受的理由是因為如果將電子視為具備有限體積的粒子，結果更糟。當第一次利用QED理論計算的數據出現時，物理學家發現結果是無限大，所以物理學家祇好利用重正則理論來「減掉」無限大的。然而引入重正則化的算法在數學上有疑問，所以科學家使用一個有疑義的數學工具於QED及其他類似的理論，如QED，這也導致科學家質疑我們對自然界的基本成分到底瞭解多少，有許多理論物理學家希望超弦理論可以解決這個問題，縱使超弦理論本身也引起相當大的爭論。有些科學家認為超弦理論可以帶領物理學家超越現有的境界，但是也有些科學家對超弦理論根本嗤之以鼻。

現代物理學家所遭遇的困難讓我們知道，對於無限的困惑並沒有比芝諾時代要好多少，對我個人來說，在天文學以及宇宙學中所遭遇的無限最為迷人，如果我們接受愛因斯坦的廣義相對論，則必然要接受陷入黑洞之中的物質將會被壓縮成無限小的概念，但是科學家已經確定愛因斯坦的理

論在還沒進入到黑洞之前，就已經失靈，但是這不過意味著我們仍舊無法瞭解黑洞奇異點的真正本質。沒有人知道在奇異點中，是不是所有的物理定律真的會失效，而奇異點會成為時間與空間的終點，或者量子重力論會不會又揭示了一些我們原先完全無法預期的事物。

就目前而言，量子重力論尚未出現，重力比其他自然力要複雜許多，質量、能量、壓力及重力場都與重力有關。科學家已證明，把重力場重正則化的努力一定會失敗。在這裡所遭遇的無限，比用來解釋各種粒子的理論中所遭遇的無限大更為難纏，因為量子重力論尚未存在，所以科學家也不清楚在次次原子尺寸的世界中，時間與空間的概念是否還能生效，因此物理學家惠勒便提出，在次次原子尺寸的世界中，時間與空間不再是連續的，其中將會出現「量子泡沫」（quantum foam），時空將會充滿許多次次原子尺寸規模的橋樑與空洞。其他的科學家則認為，空間與時間的觀念在次次原子規模的世界中不再有意義，因此如果黑洞中物質的質量密度與重力不是無窮大時，黑洞之中一定發生了些極其詭異的事情。

大半時候，物理學家將無限大視為要將理論推進到另一層次時，必須消除的障礙。但是，正如布努諾曾經做過的，在量子天文學領域中的科學家則熱情擁抱無限，聲稱必然有無限多個量子宇宙，在量子力學中，我們

通常祇談機率，當我們開始將這些理論引入宇宙學中時，我們就面臨了無限多個不同存在機率的宇宙。

當我們在玩輪盤遊戲時，我們可以觀察出相同數字出現的機率，以美國輪盤而言，相同數字出現的機率是二點六三，在蒙地卡羅，相同數字出現的機率是二點七〇。當輪盤開始旋轉，在所有的機率中，祇有一個會成真，因為一次旋轉不會出現兩種結果。

但是量子力學看待世界的方式大有不同，量子力學將機率視為基本概念，而這種機率具有日常生活世界所沒有的特性。當我們將機率指定給電子可能存在的所有位置時，我們必須將電子視為同時存在於這些位置。當物理學家思考原子中電子的行為時，將會看到環繞在原子核之外的電子雲。同樣的，如果電子可以存在於多個特定能階，我們也將電子視為同時佔有這些能階，這不僅是理論預期的結果，在許多實驗上也都證明量子力學的看法。比如說，觀察中子同時在兩個位置出現，將可以觀察到中子自我互相干涉的結果。

因此，如果量子宇宙學接受有無限多個宇宙存在的概念，就必然要仔細考慮這些宇宙極有可能存在，而且與我們的宇宙相當類似，正如蓋爾曼所說的，在未來，我們有可能與這些宇宙取得聯繫。

從其他角度來看，我們也很有理由相信有無限多個宇宙。因為大霹靂有可能不祇發生一次，而是發生了無限多次。因此正如古老哲學家認為有無限多個宇宙，現代物理學家們甚至認為不但有無限多個宇宙，而且可能會有無限多的無限個宇宙。

我必須強調，目前為止並未出現具體證據證明這些宇宙真的存在。也很難區分這種觀念到底是「科學」，還是披上數學、物理語言外衣的形上學的推測。可能存在無限多個「交錯宇宙」的觀念已經引起一些相當嚴肅的看法，會不會有無限多個你或我存在於這無限多個宇宙中？這無限多個你我的生活方式與我們的生活方式又有什麼差別？如果宇宙無止境地被創造出來，這是否表示我們會重生無限多次？

當我問這些問題時，我並不是從事形而上的推測。相反地，我祇是把腦中的一些思緒連在一起，我們正面對著無限，我們也正對應著巴斯卡曾經說過的名言：「無限虛空的永恆沈寂令我敬畏。」

國家出版品預行編目資料

--無限探索無限/Richard Morris 著
黃逸華譯--台北縣汐止鎮；新新聞文化，1998(民 87)
面；公分 -(新・科學系列 3)
譯自：Achilles in the Quantum Universe:the Definitive History of Infinity
ISBN 957-8306-02-4(平裝)
1.物理- 哲學- 原理 2.天文學-哲學

330.1 87004566

新・科學系列 3

無限探索無限

作者／Richard Morris

發行人／王健壯

法律顧問／蕭雄淋律師

出版者／新新聞文化事業股份有限公司

地址／台北縣汐止鎮新台五路一段 79 號 4F

電話／ 02-26981898

傳真／ 02-26981091

郵撥帳號／ 13201218 新新聞文化事業股份有限公司

責任編輯／蔡盈珠

版　面／唐家瑞

封面設計／李男

登記證／局版台業自第 4504 號

印刷／ 秋雨印刷

總經銷／黎銘圖書公司　　補書專線：02-2981-8089

出版日期／ 1998 年 6 月 1 日　定價／ 260 元　Printed in Taiwan

版權所有・翻印必究本書如有缺頁、破損、倒裝，請寄回更換

Copyright © 1997 by Richard Morris

Complex Chinese Characters edition arranged with Henry Holt and Compny, inc. through Bardon-Chinese Media Agency.

All Rights Reserved.

當古代哲學家芝諾（Zeno）提出著名的「阿奇里斯和烏龜的詭論」時，就碰觸到科學中最持久難解的核心問題之一，
那就是：「我們如何定義無限？」
從此，最偉大的自然哲學家、邏輯學家、數學家和科學家，
從亞里斯多德到史蒂芬霍金，
無一不受「無限」吸引而沉迷其中。

從最單純的邏輯謎題到最先進的宇宙學理論，
本書顯示出這些「無限」的問題
如何孕育科學的發展，如相對論和量子力學。
儘管「無限」在今天仍令人感到迷惑，不過現代科學家
比以往更深入探測宇宙的本質，並以古代人所無法想像的方式
捕捉「無限」的吉光片羽。
最終，我們將明白：理論上存在無限個宇宙的可能性之下，
可能隱含人類某些本質問題的解答………

98 07
三 聯 書 店
JOINT PUB. CO
$ 87.00

98070206
三 聯 書 店
JOINT PUB. CO.

ISBN 957-8306-02-4 (330)
00260
9 789578 306028
定價 260 元